La sección inducida que hemos de cerrar artificialmente no puede ser una cualquiera sino que ésta ha de ser una, por el lado del colector, contigua a la que en otro caso debería ser sección muerta. Con esto se consigue que dicha sección quede intercalada al devanado entre dos vueltas consecutivas del mismo, teniendo el devanado en esta vuelta una sección menos, que ha sido avanzada por el cierre artificial.

En este tipo de devanados ha de cumplirse que D = S = K · U, al igual que en los ondulados normales. Ademas se ejecutarán siempre sin cruzar o regresivos, con lo cual ha de cumplirse para el paso de colector :

– ***Paso de colector normal: Ycol*** $= \dfrac{(D - 1) - 1}{p} =$ *delgas*

Éste es el llamado **paso de colector normal**, ya que cuando en el paso de colector está incluida la sección que tiene el cierre artificial, su valor tiene una unidad más que la calculada. En este último caso se le denomina **paso de colector alargado o anormal**.

De lo anteriormente expresado para el paso de colector se desprende que también tiene que haber dos pasos de conexión; uno que llamaremos normal y otro una unidad mayor que denominaremos anormal o alargado:

– ***Paso de conexión normal: Y2*** $=$ *Ycol - Y1 = secciones inducidas*

– ***Paso de conexión alargado: Y2*** $=$ *(Ycol - Y1) + 1 = secciones inducidas*

A continuación, por medio del ejemplo 7.8 y su esquema correspondiente (figura 7.11), terminaremos con este tema, concerniente a los devanados ondulados con cierre artificial.

Ejemplo 7.8. Calcular y dibujar el esquema de un devanado ondulado simple, para el inducido de una máquina tetrapolar que tiene: 12 ranuras en su armadura y 24 delgas en su colector.

Por tener doble número de delgas que de ranuras, vemos que cada bobina está formada por dos secciones inducidas (U = 2). A su vez vemos que ni **K = 12** ni **U = 2** son primos con el número de pares de polos **p = 2** y, por tanto, el devanado no se puede ejecutar completo, debiendo de recurrir al empleo de una sección muerta, pero como el colector tiene 24 delgas, para no prescindir de ninguna, lo mejor es **ejecutar el devanado con cierre artificial**.

Seguidamente realizamos los cálculos necesarios para el trazado correcto del esquema.

– ***Paso de ranura o ancho de bobina: Yk*** $= \dfrac{K}{2p} = \dfrac{12}{4} =$ *3 ranuras*

– ***Ancho de sección:*** $Y1 = Yk \cdot U = 3 \times 2 = 6$ *secciones inducidas*

– ***Paso normal de colector:*** $Ycol = \dfrac{(D-1)-1}{p} = \dfrac{(24-1)-1}{2} = 11$ *delgas*

El paso de colector alargado o anormal valdrá una unidad más, o sea, 12 delgas, que utilizaremos para los pasos anteriores al cierre artificial, del esquema.

– ***Paso normal de conexión:*** $Y2 = Ycol - Y1 = 11 - 6 = 5$ *secciones inducidas*

El paso de conexión anormal o alargado tiene una unidad más, o sea, 6 secciones inducidas, con este paso de conexión realizamos los avances del esquema antes del cierre artificial. El esquema es el representado en la figura 7.11.

La sección destacada en el esquema sería la equivalente a la sección muerta, que ahora se ha incluido y completado con el cierre artificial.

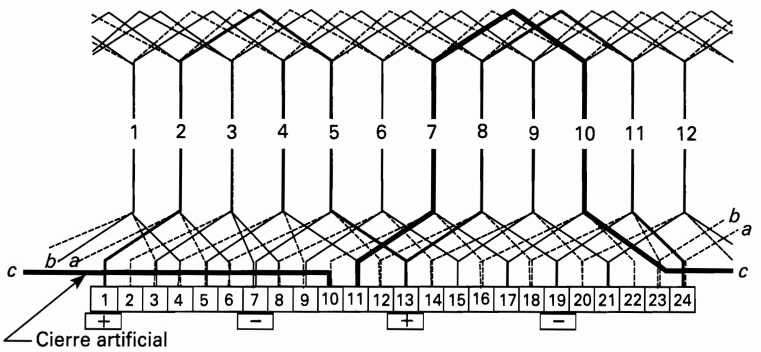


Figura 7.11. Esquema del devanado ondulado simple, con cierre artificial, correspondiente al ejemplo 7.8.

7.4. BOBINADOS ONDULADOS MÚLTIPLES

Aunque son poco empleados, debido a su deficiente conmutación, los ***devanados ondulados múltiples, también llamados en series paralelas***, suelen utilizarse para reducir la sección de los conductores, cuando las corrientes que circularían por las bobinas de un devanado ondulado simple fueran muy intensas, lo cual conllevaría al empleo de barras o pletinas conductoras muy gruesas y poco manejables, reduciéndose de esta forma la sección de dichos conductores y facilitando así la construcción de las bobinas.

En la práctica, los devanados ondulados múltiples están formados por varios devanados ondulados simples, ejecutados sobre un mismo inducido. Este tipo de devanados, al igual que ocurre con los imbricados múltiples, pueden ser: dobles, triples, etc.,

según que después de la primera vuelta del devanado se vayan dejando libres: una sección inducida si son dobles, dos secciones si son triples, etc. Consecuentemente también se dejará libre el mismo número de delgas del colector para ser ocupadas por las secciones inducidas dejadas libres, en las vueltas siguientes del devanado.

En este tipo de devanados el número de ramas en paralelo **2a** será igual al doble del número de devanados simples que lo formen:

- ***Devanado ondulado doble: 2a*** *= 2 x 2 = 4 ramas en paralelo*
- ***Devanado ondulado triple: 2a*** *= 2 x 3 = 6 ramas en paralelo*
- *Etc.*

En consecuencia, si llamamos **(a)** al número de bobinados simples o al número de secciones inducidas que separan el final de una vuelta del principio de la siguiente, para los devanados ondulados múltiples tendremos un paso de colector de:

– ***Paso de colector: Ycol*** $= \dfrac{D \pm a}{p}$ $\begin{cases} +\,\boldsymbol{a}, \text{ para un devanado cruzado} \\ -\,\boldsymbol{a}, \text{ para un devanado sin cruzar} \end{cases}$

En este tipo de devanados, para que sean perfectamente ejecutables, debe cumplirse la condición de que el número de pares de polos de la máquina **(p)** sea múltiplo exacto del número de devanados simples (**a**), lo que conlleva a que sean primos entre sí: (**p/a**) y **U,** con la finalidad de que sean iguales las **f.e.m** generadas en cada una de sus ramas simples, eliminando así las corrientes internas de compensación entre ellas. Esto implica que también han de ser perfectamente divisibles entre sí, dando por resultado un número entero, las relaciones siguientes: **S/a**, **D/a**, **K/a** y **2p/a**. La tabla 7.2 nos resume las principales condiciones que ha de tener uno de estos devanados, para que sea perfectamente ejecutable.

TABLA 7.2. Relaciones necesarias para la ejecución de devanados ondulados múltiples.

Pares de polos (p)	Pares de ramas (a)	Relación (p/a)	Secciones por bobina (U)
2	2	1	1, 2, 3, 4
3	3	1	1, 2, 3, 4
4	2	2	1, 3, 5
	4	1	1, 2, 3, 4
6	2	3	1, 2, 4, 5
	3	2	1, 3, 5
8	2	4	1, 3, 5
	4	2	1, 3, 5

Proceso de cálculo de un devanado ondulado múltiple

El proceso de cálculo, aparte de las condiciones de simetría o de posibilidad de ejecución específicas de este tipo de devanados, es similar al realizado para los tipos de devanados anteriormente descritos, principalmente para los ondulados simples. Para ello partiremos siempre de los datos conocidos siguientes:

- Número de polos de la máquina: **2p**
- Número de ranuras del inducido: **K**
- Número de devanados simples: **a** = **2a/2**
- Uno de los tres valores siguientes: **U, S, D**

Primeramente verificamos que se cumplen las condiciones de simetría necesarias para la correcta ejecución del devanado, principalmente las relacionadas en la tabla 7.2; pasando seguidamente a calcular:

- ***El ancho de bobina o paso de ranura: Yk*** $= \dfrac{K}{2p} =$ *ranuras*
- ***El ancho de sección: Y1*** $= Yk \cdot U =$ *secciones inducidas*
- ***El paso de colector: Ycol*** $= \dfrac{D \pm a}{p} =$ *delgas*
- ***El paso de conexión: Y2*** $= Ycol - Y1 =$ *secciones inducidas*

Una vez obtenidos estos valores, y recordando que para el paso de colector tomaremos (**–a**) si queremos un devanado sin cruzar y (**+ a**) si lo queremos cruzado, ya se puede dibujar el esquema completo, como es el caso de la figura 7.12, correspondiente al ejemplo 7.9 que vemos a continuación.

Ejemplo 7.9. Dibujar el esquema de un devanado ondulado doble, sin cruzar, para el inducido de una dínamo tetrapolar, que tiene 18 ranuras y 18 delgas en su colector.

Al tener el mismo número de ranuras que de delgas, sabemos que cada bobina está formada por una sola sección inducida (D = S = K · U = 18).

A continuación verificamos la correcta ejecución del devanado, al cumplirse las relaciones siguientes y las condiciones de la tabla 7.2.

Condiciones de simetría: $\dfrac{K}{a} = \dfrac{S}{a} = \dfrac{D}{a} = \dfrac{K \cdot U}{a} = \dfrac{18 \times 1}{2} = 9 =$ *número entero*

Y también: $\dfrac{2p}{a} = \dfrac{4}{2} = 2 =$ *número entero*

Por la tabla 7.2 también vemos que la ejecución es correcta, al cumplirse: $p = 2$, $a = 2$, $p/a = 1$, $U = 1$.

Seguidamente realizamos los cálculos necesarios para el trazado correcto del esquema.

– ***Paso de ranura o ancho de bobina:*** $\boldsymbol{Yk} = \dfrac{K}{2p} = \dfrac{18}{4} = 4{,}5$ *ranuras*

Al ser fraccionario el resultado tomaremos un paso acortado: ***Yk = 4***

– ***Ancho de sección:*** $\boldsymbol{Y1} = Yk \cdot U = 4 \times 1 = 4$ *secciones inducidas*

Como deseamos un devanado sin cruzar, tomamos (**-a**) para el paso de colector

– ***Paso de colector:*** $\boldsymbol{Ycol} = \dfrac{(D-a)}{p} = \dfrac{(18-2)}{2} = 8$ *delgas*

– ***Paso de conexión:*** $\boldsymbol{Y2} = Ycol - Y1 = 8 - 4 = 4$ *secciones inducidas*

Con estos datos realizamos ya el esquema completo, que es el representado en la figura 7.12.

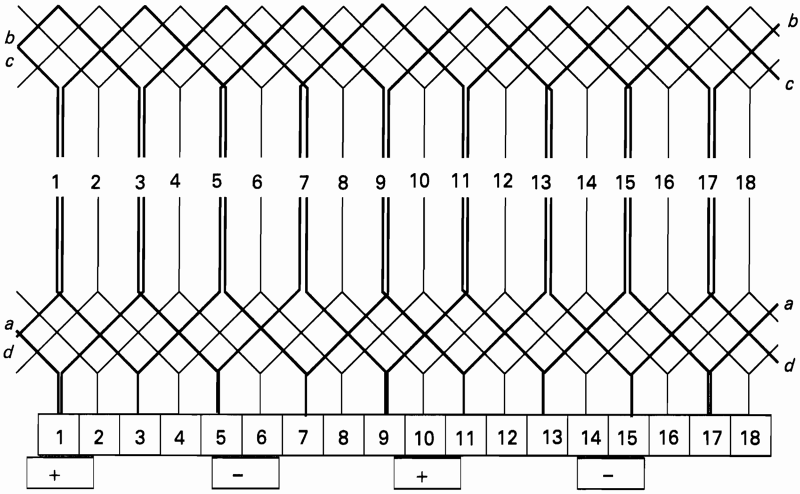


Figura 7.12. Esquema del devanado ondulado doble, del ejemplo 7.9.

Terminaremos el estudio de los devanados ondulados múltiples con el nuevo ejemplo 7.10 y el dibujo de su correspondiente esquema, en la figura 7.13.

Ejemplo 7.10. Dibujar el esquema de un devanado ondulado triple, sin cruzar, para el inducido de una dínamo exapolar, que tiene 36 ranuras y 36 delgas en su colector.

Al tener el mismo número de ranuras que de delgas, sabemos que cada bobina está formada por una sola sección inducida (D = S = K · U = 36).

A continuación verificamos que el devanado es perfectamente ejecutable, al cumplirse las relaciones siguientes y las condiciones de la tabla 7.2.

Condiciones de simetría: $\dfrac{K}{a} = \dfrac{S}{a} = \dfrac{D}{a} = \dfrac{K \cdot U}{a} = \dfrac{36 \times 1}{3} = 12 = \textit{número entero}$

Y también: $\dfrac{2p}{a} = \dfrac{6}{3} = 2 = \textit{número entero}$

Por la tabla también vemos que la ejecución es correcta, al cumplirse: $p = 3$, $a = 3$, $p/a = 1$, $U = 1$

Seguidamente realizamos los cálculos necesarios para el trazado correcto del esquema.

– ***Paso de ranura o ancho de bobina: Yk*** $= \dfrac{K}{2p} = \dfrac{36}{6} = 6$ *ranuras*

– ***Ancho de sección: Y1*** $= Yk \cdot U = 6 \times 1 = 6$ *secciones inducidas*

Como deseamos un devanado sin cruzar, tomamos (**-a**) para el paso de colector.

– ***Paso de colector: Ycol*** $= \dfrac{(D - a)}{p} = \dfrac{(36 - 3)}{3} = 11$ *delgas*

– ***Paso de conexión: Y2*** $= Ycol - Y1 = 11 - 6 = 5$ *secciones inducidas*

Con estos datos realizamos ya el esquema completo, que es el representado en la figura 7.13.

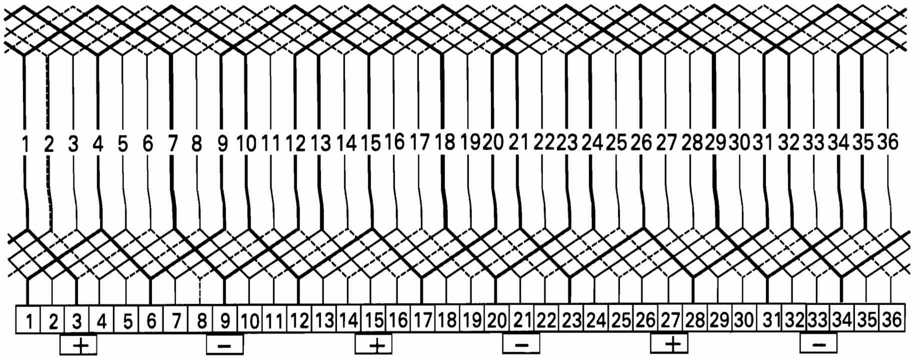


Figura 7.13 . Esquema del devanado ondulado triple, del ejemplo 7.10.

Resumen de los devanados ondulados de corriente continua

Seguidamente, y como compendio de los dos apartados anteriores, se resumen las condiciones de simetría o de posibilidad de ejecución, estudiadas anteriormente, para todo tipo de devanado ondulado:

- El número de ranuras ***K*** y el de secciones inducidas ***U*** son primos (no divisibles) respecto del número de pares de polos ***p***. Se puede ejecutar un ***devanado ondulado simple normal***.
- El número de ranuras ***K*** y el número de secciones inducidas ***U***, ya sean los dos a la vez o uno solo, no son primos del número de pares de polos ***p***. Se puede ejecutar un ***devanado ondulado simple con una sección muerta.***
- El número de ranuras ***K***, el de secciones inducidas ***U*** y el de delgas del colector ***D*** no son primos del número de pares de polos ***p***. Se puede ejecutar un ***devanado ondulado simple con cierre artificial.***
- Las relaciones del número de pares de polos ***p*** y del número de ranuras ***K*** con el número de devanados simples ***a*** son múltiplos exactos (***p/a*** *y* ***K/a*** *igual a número entero*). Se puede ejecutar un ***devanado ondulado múltiple o en series paralelas***.

7.5. CONEXIONES EQUIPOTENCIALES, PARA DEVANADOS DE CORRIENTE CONTINUA

Aparte de las condiciones de simetría o de posibilidad de ejecución, expuestas en los apartados anteriores, los devanados para dínamos de corriente continua deben cumplir otras dos condiciones muy importantes, como son:

- Que las fuerzas electromotrices **(f.e.m.)** totales, generadas en los distintos circuitos en paralelo, deben ser iguales en todos ellos, para que no existan corrientes internas de circulación, entre sus distintas ramas, que aumenten el calentamiento y las pérdidas de potencia de la máquina.
- Que las resistencias internas de todos sus circuitos en paralelo sean completamente iguales, para que la carga se distribuya por igual en todas las ramas en paralelo, evitando así calentamientos excesivos en determinadas bobinas.

Para que puedan cumplirse las dos condiciones anteriores es preciso que en todo devanado, ya sea imbricado u ondulado, sencillo o múltiple, se cumplan también escrupulosamente las condiciones siguientes:

- Que todas las ramas en paralelo, que conforman el devanado, tengan el mismo número de lados activos.

- Que todas las bobinas tengan el mismo número de secciones inducidas y éstas el mismo número de espiras cada una.
- Que todas las bobinas tengan exactamente igual longitud en sus lados activos e igual longitud total de conductor. Para ello deben ejecutarse todas sobre un mismo molde.

Aun cumpliéndose todas estas condiciones se observa, sobretodo en las dínamos de mediana y gran potencia, que las **f.e.m.** generadas en las distintas ramas en paralelo de un devanado son desiguales, debido a que los flujos de los distintos circuitos magnéticos no son exactamente iguales, debido a alguna de las causas siguientes:

- Existen pequeñas diferencias en el entrehierro, entre las diferentes masas polares y el inducido, debido a un defecto mecánico: bien sea del inductor, del inducido o de los cojinetes de la máquina.
- Existen pequeñas diferencias entre la reluctancia de sus circuitos magnéticos, debido al empleo de chapas magnéticas de diferentes calidades o bien con porosidades o defectos de fabricación significativos.
- Las **f.e.m.** de los distintos circuitos de excitación de la máquina no son iguales en todos sus polos, debido sobre todo a que: las espiras no son iguales en todas las bobinas, existen espiras en cortocircuito en alguna de ellas, etc.

Conexiones equipotenciales de primera clase

Debido a todo lo anteriormente expuesto, para que sean idénticas las **f.e.m.** en todas las ramas en paralelo, sobretodo en las dínamos de mediana y gran potencia, es necesario dotar a los devanados de inducido de las denominadas ***conexiones equipotenciales***, que como su propio nombre indica han de unir puntos del devanado que teóricamente deberían tener igual potencial eléctrico. Estos puntos equipotenciales se corresponden con las bobinas o secciones inducidas que, en todo momento, ocupen posiciones relativas exactamente iguales bajo polos del mismo nombre, o sea separadas entre sí un doble paso polar, tal como se ve en los dibujos de la figura 7.14.

Según se aprecia en la figura 7.14, los puntos o ranuras **A, A´, A´´ y A´´´**, por ejemplo, ocuparán siempre, entre sí, la misma posición relativa, ya sea bajo polos norte o polos sur, durante todo el giro del inducido. Por tanto, serán siempre puntos equipotenciales que pueden ser conectados entre sí. De igual forma todas las ranuras o secciones inducidas, que ocupen posiciones similares a las del ejemplo, son susceptibles de ser unidas entre sí con conexiones equipotenciales.

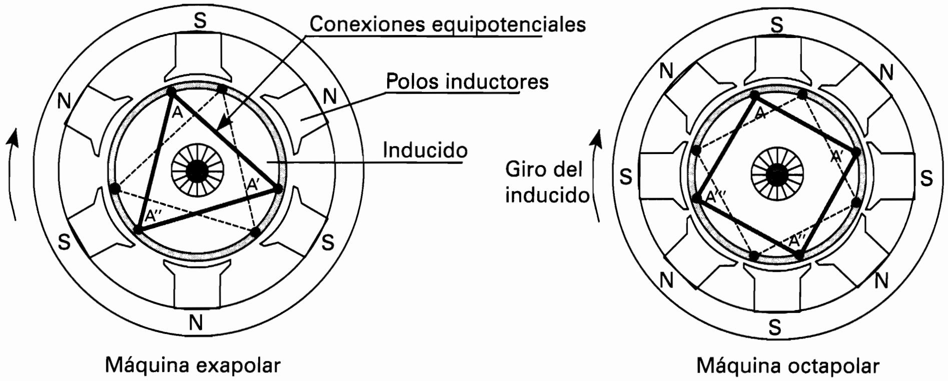


Figura 7.14. Posición correcta de las conexiones equipotenciales de 1ª clase.

Con las conexiones equipotenciales, esquematizadas en la figura 7.14 y denominadas **conexiones equipotenciales de primera clase**, se consigue que de existir corrientes internas de compensación, entre las diferentes ramas en paralelo de un devanado, éstas se cierren a través de dichas conexiones, sin pasar por las escobillas, para que de esta forma las corrientes y chispas elevadas no las deterioren prematuramente. Si la máquina no estuviera descompensada, debido a su esmerada construcción, ningún daño pueden hacerle las conexiones equipotenciales, ya que éstas se colocan lo más cortas posibles y se fabrican de una gran sección, para que la pérdida de potencia que puedan originar en la máquina sea inapreciable.

Las conexiones equipotenciales se colocan en las cabezas de las bobinas, ya sea por la parte del colector o por su parte posterior, conectadas a las secciones inducidas correspondientes. En la práctica suelen colocarse:

- Soldadas a las delgas del colector, por lo general en la parte interna de las mismas. Este sistema suele emplearse cuando las bobinas están realizadas con hilo y las delgas del colector son suficientemente gruesas.

- Conectadas a los casquillos posteriores que completan las secciones inducidas, cuando el devanado está ejecutado con pletinas y con una única espira por sección inducida generalmente.

Los devanados ondulados simple o sencillos no necesitan conexiones equipotenciales, debido a su particular constitución de poseer siempre dos únicas ramas en paralelo que, a su vez, podrían tener solamente dos escobillas, una de entrada y

otra de salida, con lo cual no puede existir entre ellas corriente alguna de compensación interna. En general, siempre que el devanado no tenga más de dos ramas en paralelo, no necesita conexiones equipotenciales. Por tal motivo, tampoco las necesitan los devanados imbricados simples bipolares.

Número y paso de las conexiones equipotenciales, de primera clase

Dado que este tipo de conexiones equipotenciales deben unir puntos del devanado con igual potencial, situados bajo los distintos circuitos magnéticos o polos inductores de la máquina, por la figura 7.14 vemos que dichos puntos son los que en todo momento se hallan situados en posición homóloga bajo polos inductores del mismo nombre.

Así en dicha figura se aprecia que en una máquina tetrapolar los puntos equipotenciales existirán en grupos de dos, en la exapolar en grupos de tres, en la octapolar en grupos de cuatro, etc. Con todo esto es fácil deducir que solamente se pueden unir, mediante una conexión equipotencial, tantos puntos como pares de polos (**p**) tiene la máquina.

En la práctica se ha comprobado que no es necesario unir todas las secciones inducidas, mediante conexiones equipotenciales y, por tanto, se suele unir, como máximo, una sola sección inducida por bobina o ranura. Como cada conexión equipotencial ha de unir tantos puntos como pares de polos, el número total de conexiones equipotenciales (**Neq**) de un devanado será:

$$\textbf{\textit{Número de conexiones equipotenciales: Neq}} = \frac{K}{p}$$

Y su paso de conexión, según se realice sobre delgas o por la parte posterior de las bobinas, se puede obtener con alguna de las expresiones siguientes:

$$\textbf{\textit{Para devanados imbricados: Yeq}} = \frac{K}{p} = \frac{D}{a} = \frac{S}{a} = \textit{ranuras, delgas o secciones}$$

$$\textbf{\textit{Para devanados ondulados múltiples: Yeq}} = \frac{K}{a} = \textit{ranuras}$$

A continuación y para terminar este tema, vemos tres ejemplos de devanados de inducido provistos de conexiones equipotenciales de primera clase, dos ejecutados sobre las cabezas posteriores de las bobinas (7.15 y 7.16) y el otro ejecutado por delante, sobre las propias delgas del colector (7.17).

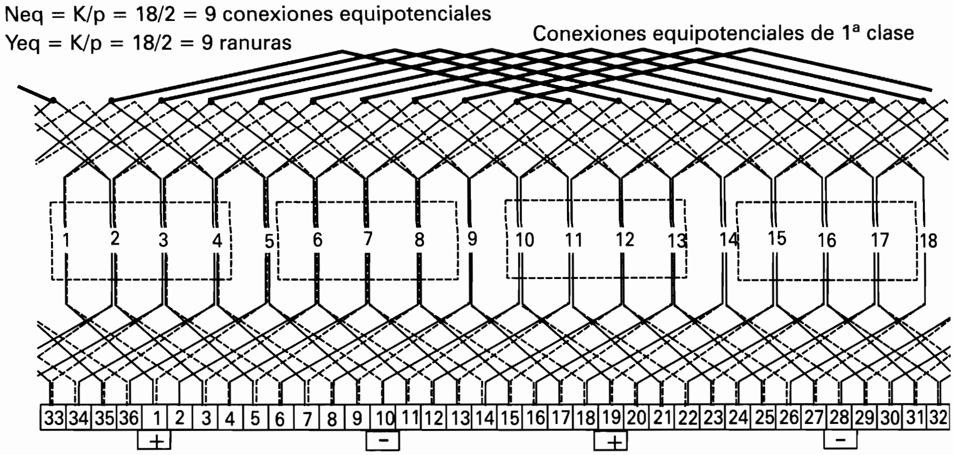


Figura 7.15. Esquema del devanado imbricado simple tetrapolar, con conexiones equipotenciales de primera clase, sobre las cabezas posteriores de las bobinas.

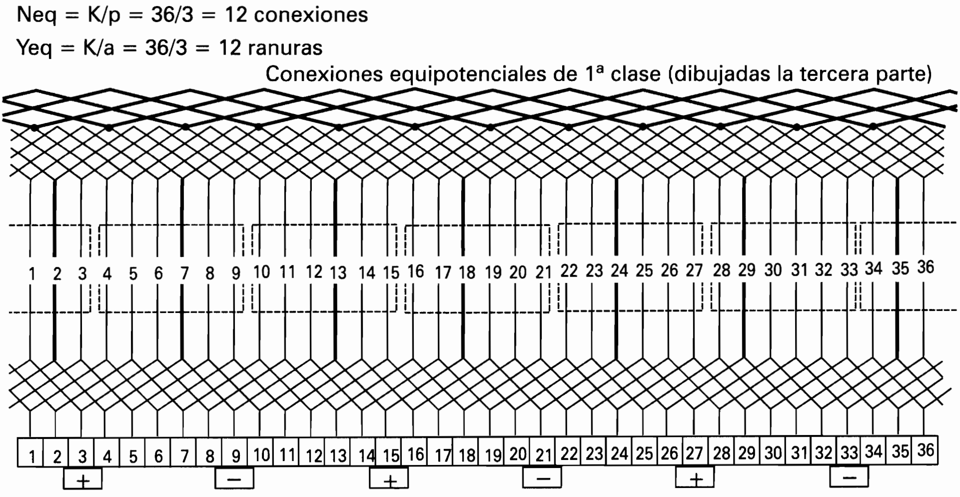


Figura 7.16. Esquema del devanado ondulado triple, exapolar, con conexiones equipotenciales de primera clase, sobre las cabezas posteriores de las bobinas.

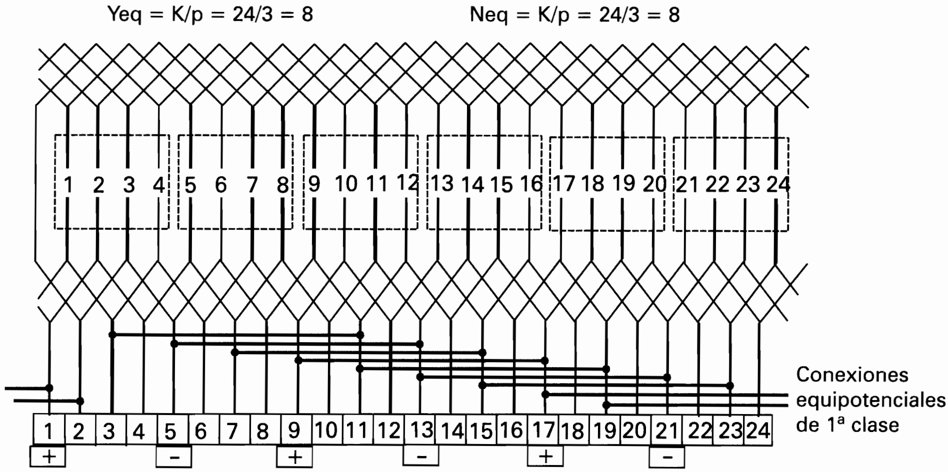


Figura 7.17. Esquema del devanado imbricado simple exapolar, con conexiones equipotenciales de primera clase, sobre las delgas del colector.

Conexiones equipotenciales de segunda clase

Además de las conexiones equipotenciales de primera clase, en los devanados múltiples de máquinas de mediana o gran potencia, ya sean imbricados u ondulados, deben colocarse otras denominadas ***conexiones equipotenciales de segunda clase***. Estas conexiones han de unir entre sí los diferentes devanados simples, que componen el devanado múltiple, con el fin de compensar también las **f.e.m**. de los distintos devanados, evitando de ese modo que a través de las escobillas circulen grandes corrientes de compensación interna. Este tipo de conexiones equipotenciales también son muy importantes ya que, como este tipo de circuitos suele ser recorrido por corrientes muy altas, podrían originar caídas de tensión importantes, muy desiguales entre las ramas o los circuitos simples en paralelo del devanado.

Hay que tener muy presente también que para poder colocar en un devanado múltiple este tipo de conexiones, **ha de poseer un número par de secciones inducidas por bobina**, con el fin de que las secciones inducidas de distinta rama conectadas entre sí, pertenezcan a la misma ranura y estén sometidas en todo momento al mismo flujo magnético de los polos inductores ya que, en caso contrario, no serían totalmente equipotenciales.

Las conexiones equipotenciales de **segunda clase** se colocan, por lo general, en las cabezas posteriores de las bobinas, conectando entre sí las secciones inducidas de una misma bobina (ver figuras 7.18 y 7.19) y, aunque en los esquemas de las figuras se han dibujado todas las conexiones equipotenciales posibles, en la prácti-

ca, al igual que ocurría con las de primera clase, tampoco es necesario colocar todas las conexiones equipotenciales de segunda clase. Cuando el número de ramas en paralelo o secciones inducidas por bobina es muy elevado, basta con repartir algunas de ellas, simétricamente distribuidas por la periferia del inducido.

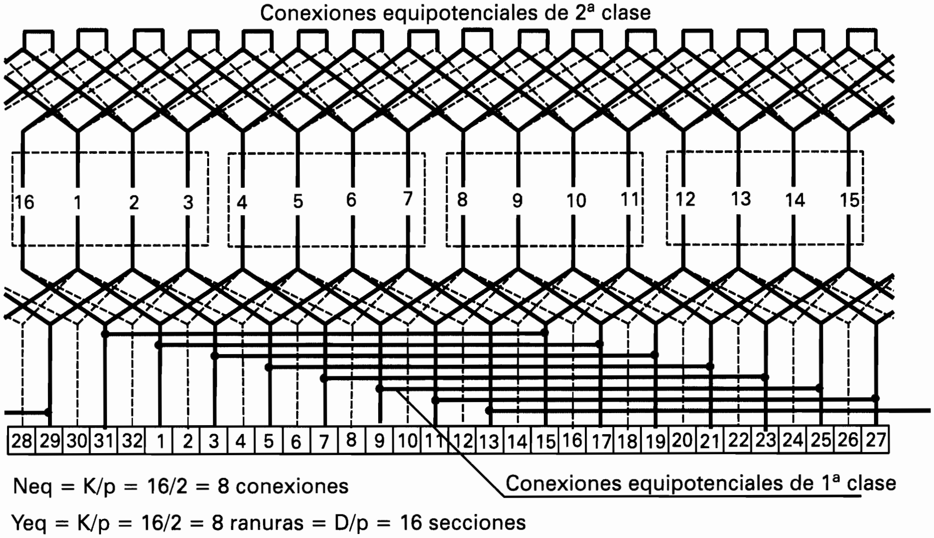


Figura 7.18. Esquema del devanado imbricado doble, con conexiones equipotenciales: de 1ª clase sobre delgas del colector y de 2ª clase sobre cabezas posteriores.

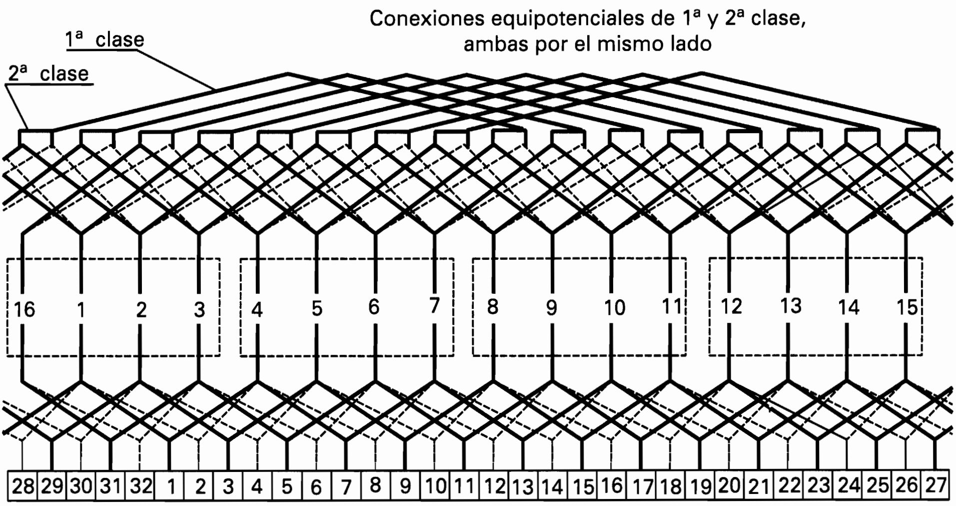


Figura 7.19. El mismo esquema del devanado imbricado doble, de la figura 7.18, con los dos tipos de conexiones equipotenciales sobre las cabezas posteriores de las bobinas.

8

CÁLCULO Y EJECUCIÓN DE DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA

8.1. DEVANADOS CONCÉNTRICOS TRIFÁSICOS

Según se mencionó ya en el capítulo 5 de esta obra, los devanados empleados en las máquinas de corriente alterna pueden ser ejecutados de muy diversas formas, al igual que los de corriente continua, pudiendo ser estos:

- **Concéntricos**.
- **Excéntricos**. Estos a su vez pueden ser:
  - Imbricados (enteros y fraccionarios).
  - Ondulados (enteros y fraccionarios).

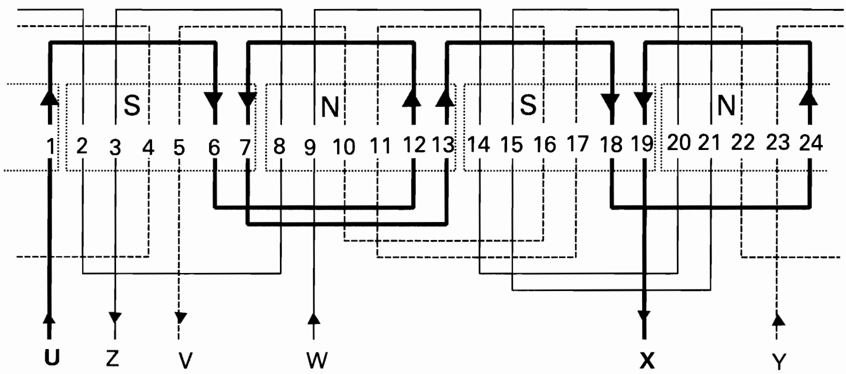
Un devanado de corriente alterna es ***concéntrico*** cuando los lados activos de una misma fase, situados en ranuras que estén frente a polos consecutivos, son unidos entre sí mediante conexiones o cabezas de bobina concéntricas, como si las bobinas situadas en ranuras consecutivas, pertenecientes a un mismo grupo, fueran parte de una sola bobina, concéntricamente distribuida en varias ranuras, tal como se aprecia en la figura 8.1 y siguientes.

Como ya se mencionó en el apartado 5.2 de esta obra, y se aprecia en la figura 8.1, los devanados concéntricos de corriente alterna pueden ser ejecutados ***por polos*** o ***por polos consecuentes***, consiguiendo con ambos tipos el mismo fin. No obstante, se suelen emplear más los devanados ejecutados **por polos**, cuando se trata de devanados monofásicos o bifásicos, debido a que sus cabezas de bobina son más pequeñas y se ahorra en el cobre conductor; mientras que en los devanados de motores trifásicos se suele emplear más el sistema de **polos consecuentes**, ya que se reduce el número de modelos de cabezas de bobina, lo que redunda en su mejor colocación en la periferia de los núcleos magnéticos.

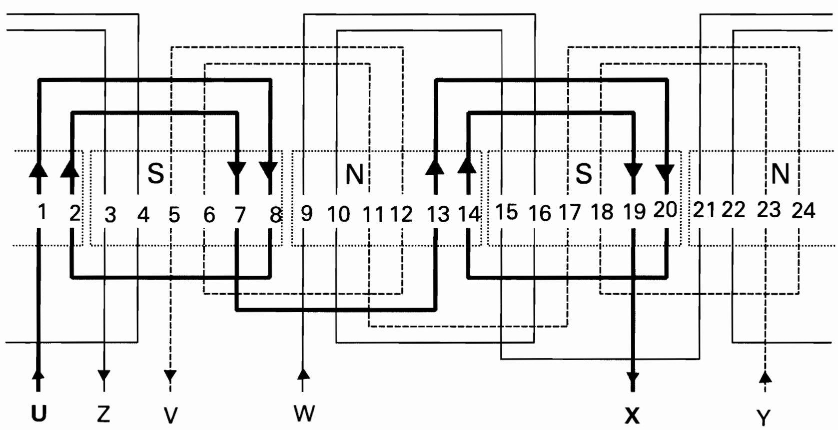
Salvo raras excepciones, los devanados concéntricos de corriente alterna se ejecutan de una capa por ranura, o sea, que en cada ranura solamente se colocan los lados activos de una sola bobina. Consecuentemente el número de bobinas que forman un grupo ***Ug*** será el doble, si está ejecutado por polos consecuentes que si lo está por polos, o sea:

– ***Devanados por polos:*** $Ug = \dfrac{K}{4p \cdot q} = bobinas$

– ***Devanados por polos consecuentes:*** $Ug = \dfrac{K}{2p \cdot q} = bobinas$



Devanado realizado *"por polos"*



Devanado realizado *"por polos consecuentes"*

Figura 8.1. Esquema de un mismo devanado concéntrico, realizado "por polos" y "por polos consecuentes".

Proceso de cálculo de un devanado concéntrico trifásico.

Como las definiciones de las magnitudes necesarias para el cálculo y posterior dibujo del esquema de este tipo de devanados ya se describieron en el capítulo 5 de esta obra, en lo que sigue nos limitaremos a describir el proceso y el mejor orden a seguir en este tipo de trabajos, seguido de unos ejemplos prácticos de cálculo y dibujado del esquema de motores reales, muy comúnmente empleados en la industria.

El proceso de cálculo a seguir para este tipo de devanados, concéntricos, trifásicos, de corriente alterna, lo podemos descomponer en seis fases perfectamente diferenciadas, a saber:

1. Atendiendo al número de fases ***(q)***, al de polos ***(2p)*** de la máquina y a la dificultad de ejecución o colocación de las conexiones y cabezas de bobina, se elegirá el tipo de devanado, bien sea ***por polos*** o ***por polos consecuentes***.

2. Se comprobará la **posibilidad de ejecución**, teniendo en cuenta que para este tipo de devanados de corriente alterna, según cuál sea su tipo, debe cumplirse:

   – ***Por polos consecuentes***. El número de ranuras por polo y fase ***(Kpq = K / 2p q)*** debería ser un número entero. Si fuera el resultado *entero mas ½*, se debe ejecutar un *devanado concéntrico mixto*, bien sea: realizando la bobina exterior de cada grupo con la mitad de espiras y colocando en algunas ranuras dos medias bobinas, o bien haciendo la mitad de los grupos con una bobina de menos.

   – ***Por polos***. El número de ranuras por polo y fase ***(Kpq = K / 2p q)*** debería ser un número entero. Si su valor es **par,** todos los grupos tendrán el mismo número de bobinas y de espiras, mientras que **si su valor es impar,** se puede hacer un devanado mixto, de forma similar a los de polos consecuentes: bien sea ejecutando la mitad de los grupos con una bobina menos, o haciendo grupos iguales con la bobina exterior de la mitad de espiras y colocando dos de estas medias bobinas en la misma ranura.

3. Se calcula el número de grupos de bobinas ***(G)*** que ha de tener el devanado. Recordando que según sean éstos ejecutados *por polos* o *por polos consecuentes* su valor será:

   – ***Por polos***: *Grupos por fase* = $Gf = 2p$; *Grupos totales* = $G = 2p \cdot q$

   – ***Por polos consecuentes***: *Grupos por fase* = $Gf = p$; *Grupos totales* = $G = p \cdot q$

4. Seguidamente se calcula el **número de bobinas** que compone cada grupo (***Ug***), que también dependerá del tipo de devanado que se desea ejecutar, así tendremos:

– ***Por polos:*** $Ug = \dfrac{B}{G} = \begin{cases} \dfrac{K}{2p \cdot q} & \textit{Para devanados de dos capas} \\ \dfrac{K}{4p \cdot q} & \textit{Para devanados de una sola capa} \end{cases}$

– ***Por polos consecuentes:*** $Ug = \dfrac{B}{G} = \begin{cases} \dfrac{K}{p \cdot q} & \textit{Para devanados de dos capas} \\ \dfrac{K}{2p \cdot q} & \textit{Para devanados de una capa} \end{cases}$

5. Una vez determinado el número de bobinas por grupo ***(Ug)*** que, por lo general, serán a una capa, ya se puede determinar la **amplitud de grupo** ***(m)*** y el ancho de cada bobina, cuyo valor también dependerá del tipo de devanado elegido;

   – *Devanado* ***por polos: m*** $= (q - 1)\ 2\ Ug$ *= ranuras libres*

   – *Devanado* ***por polos consecuentes: m*** $= (q - 1)\ Ug$ *= ranuras libres*

   Ancho de las bobinas: $Y_1 = m + 1$; $Y_2 = m + 3$; $Y_3 = m + 5$; *etc = ranuras*

6. Por último, se calcula la **distancia entre principios de fases** ***(Yq)*** y se realiza la tabla de entradas correspondiente, descrita en el apartado 5.2, que para devanados trifásicos, ya sean ejecutados por polos o por polos consecuentes, tendrá un valor de:

   – ***Distancia entre principios de fases:*** $Yq = \dfrac{K}{3p}$ *= ranuras*

Una vez obtenidos todos estos datos, ya se puede dibujar el esquema completo del devanado, procurando diferenciar las bobinas y las conexiones de las distintas fases, bien sea con distintos colores o trazos, marcando además las entradas y salidas de cada fase, las ranuras y cualquier otra indicación que fuera necesaria, para facilitar la posterior ejecución práctica del devanado. Para los tres principios de fase se elegirán de la tabla los más apropiados, que serán en la práctica los que requieran cables más cortos hasta la placa de bornes de la máquina.

A continuación realizaremos cuatro ejemplos prácticos, de cálculo y dibujado del esquema correspondiente. Dos de ellos referidos al mismo motor (ejemplos 8.1 y 8.2), pero ejecutado el primero por polos consecuentes (*figura 8.2*) y el segundo por polos (*figuras 8.3 y 8.4*). El tercero (ejemplo 8.3), que es un devanado concéntrico por polos consecuentes, por ser fraccionario su número de ranuras por polo y fase, se realizará mixto con grupos de distinto número de bobinas. Por último, el ejemplo 8.4, que es un devanado por polos, pero con

número de ranuras por polo y fase impar, se realizará con grupos de bobinas de distinto número de espiras.

Los esquemas se han dibujado de tres formas, con grupos y cabezas de bobinas distintos, para poder apreciar mejor las distintas posibilidades de representación de este tipo de devanados.

Ejemplo 8.1. Calcular y dibujar el esquema correspondiente de un devanado concéntrico trifásico, tetrapolar, para un motor de 48 ranuras, ejecutado *por polos consecuentes* y a una capa.

Primeramente comprobamos que es posible su ejecución completa, ya que se cumple que el número de ranuras por polo y fase ***Kpq*** es un número entero.

Número de ranuras por polo y fase: Kpq $= \dfrac{K}{2p \cdot q} = \dfrac{48}{4 \times 3} = 4$ *(número entero)*

Calculamos a continuación el número total de grupos de bobinas, comprobando que por ser un número par todos los grupos tendrán el mismo número de bobinas y éstas el mismo número de espiras:

Número de grupos de bobinas: G $= p \cdot q = 2 \times 3 = 6$ *grupos de bobinas*

Seguidamente calculamos el número de bobinas que tiene cada grupo:

Número de bobinas por grupo: Ug $= \dfrac{K}{2p \cdot q} = \dfrac{48}{4 \times 3} = 4$ *bobinas por grupo*

Calculamos ahora la amplitud de grupo, para determinar el ancho de cada bobina:

Amplitud de grupo: m $= (q - 1)\, Ug = (3 - 1)\, 4 = 8$ *ranuras libres*

Por último, determinamos la distancia entre principios de fases y elaboramos la tabla correspondiente:

Distancia entre principios de fases: Yq $= \dfrac{K}{3p} = \dfrac{48}{3 \times 2} = 8$ *ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	9	17
25	33	41

Para dibujar el esquema correspondiente (figura 8.2) tomaremos como entradas de fases las ranuras: 1, 9 y 17.

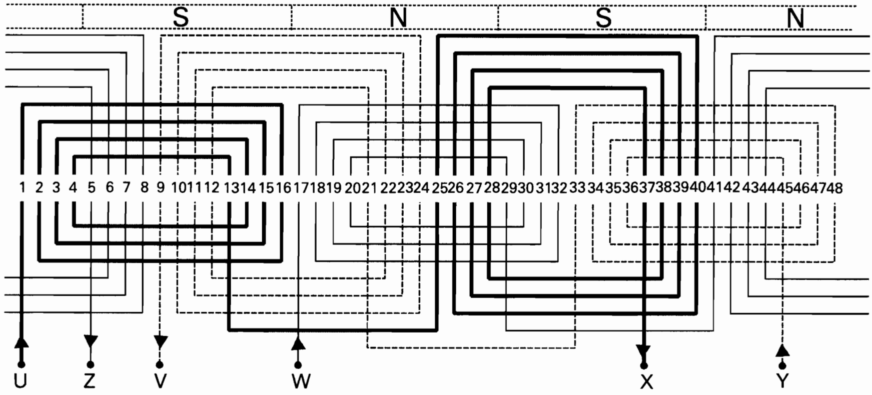


Figura 8.2. Esquema del devanado concéntrico, trifásico, tetrapolar, ejecutado por polos consecuentes, del ejemplo 8.1.

Ejemplo 8.2. Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado concéntrico trifásico, tetrapolar, para el motor de 48 ranuras del ejemplo anterior, pero ejecutado ahora *por polos* y a una capa.

Primeramente comprobamos que también es posible su ejecución completa, ya que se cumple que el número de ranuras por polo y fase ***Kpq*** es un número entero y par.

Número de ranuras por polo y fase: Kpq $= \dfrac{K}{2p \cdot q} = \dfrac{48}{4 \times 3} = 4$ *(número entero y par)*

Calculamos a continuación el número total de grupos de bobinas, comprobando que por ser un número par todos los grupos tendrán el mismo número de bobinas y éstas el mismo número de espiras:

Número de grupos de bobinas: G $= 2p \cdot q = 2 \times 2 \times 3 = 12$ *grupos de bobinas*

Seguidamente calculamos el número de bobinas que tiene cada grupo:

Número de bobinas por grupo: Ug $= \dfrac{K}{4p \cdot q} = \dfrac{48}{8 \times 3} = 2$ *bobinas por grupo*

Calculamos ahora la amplitud de grupo, para determinar el ancho de cada bobina:

Amplitud de grupo: m $= (q - 1)\, 2\, Ug = (3 - 1)\, 4 = 8$ *ranuras libres*

Por último, determinamos la distancia entre principios de fases y elaboramos la tabla correspondiente:

Distancia entre principios de fases: Yq $= \dfrac{K}{3p} = \dfrac{48}{3 \times 2} = 8$ *ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	9	17
25	33	41

Para dibujar el esquema correspondiente (figuras 8.3 y 8.4) tomaremos como entradas de fases las ranuras: 1, 9 y 17, igual que en el ejemplo anterior.

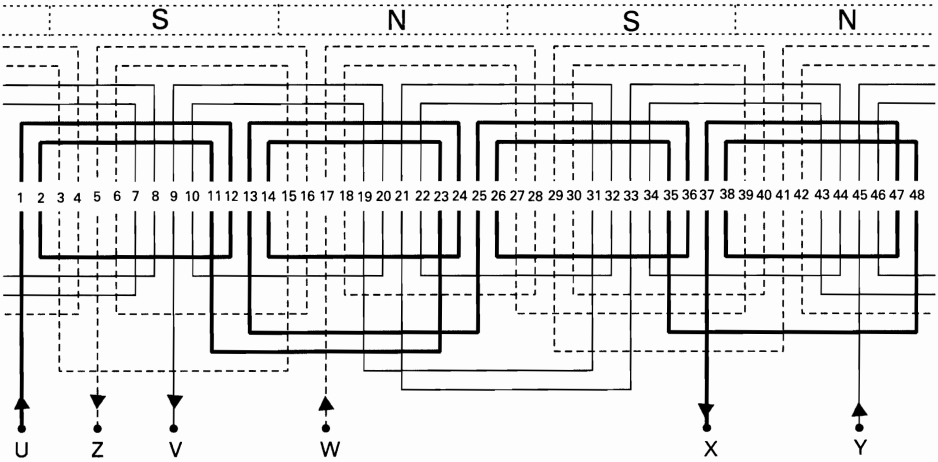


Figura 8.3. Esquema del devanado concéntrico, trifásico, tetrapolar, ejecutado por polos, del ejemplo 8.2.

Observación: Según se aprecia en los dos ejemplos anteriores (figuras 8.2 y 8.3), según sea el tipo de devanado y para que se formen correctamente las polaridades, las conexiones entre los grupos de bobinas de una misma fase se realizarán siempre:

- ***Devanados por polos***. Se conectará siempre, *salida con salida y entrada con entrada.*
- ***Devanados por polos consecuentes***. Se conectará siempre, *salida con entrada y entrada con salida.*

Una vez terminados los devanados, para que pueda funcionar la máquina, han de realizarse las conexiones de sus entradas (U, V, W) y sus salidas (X, Y, Z), en *estrella* o *triángulo*, de acuerdo con su tensión de trabajo. Esto puede hacerse dentro del propio motor o mejor en la placa de bornes del mismo, una vez se hayan sacado las tres entradas y las tres salidas, a sus bornes correspondientes.

En la figura 8.4 se ha dibujado una representación diferente del esquema correspondiente al ejemplo 8.2, ejecutado de tal forma que todos los grupos de bobinas sean iguales, con un solo modelo de cabezas, facilitando así su construcción. Este sistema de representación se utiliza bastante, ya que necesita menos espacio y es muy representativo y fácil de seguir.

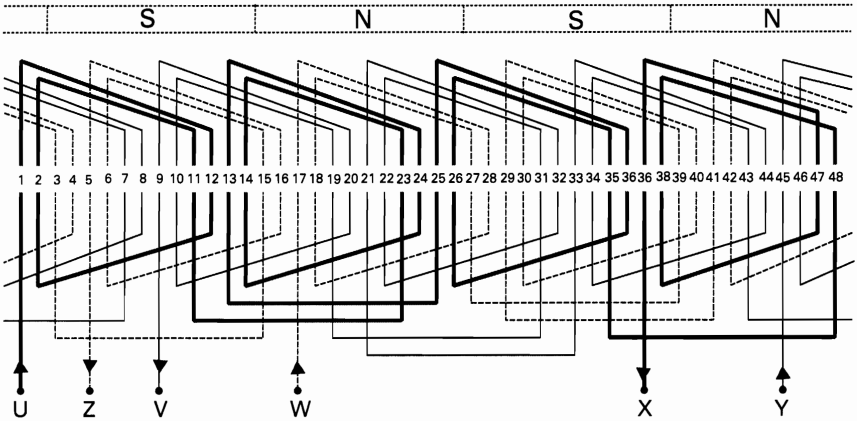


Figura 8.4. Esquema del devanado concéntrico, trifásico, tetrapolar, ejecutado por polos, del ejemplo 8.2. Con un solo modelo de cabezas de bobina

---

Ejemplo 8.3. Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado concéntrico trifásico, octapolar, para un motor de 60 ranuras, ejecutado *por polos consecuentes* y a una capa.

Primeramente comprobamos que no es posible su ejecución completa, ya que no se cumple que el número de ranuras por polo y fase ***Kpq*** sea un número entero.

Número de ranuras por polo y fase: Kpq $= \dfrac{K}{2p \cdot q} = \dfrac{60}{8 \times 3} = 2{,}5$ *(número fraccionario)*

Calculamos a continuación el número total de grupos de bobinas:

Número de grupos de bobinas: G $= p \cdot q = 4 \times 3 = 12$ *grupos de bobinas*

Seguidamente calculamos el número de bobinas que tiene cada grupo:

Número de bobinas por grupo: Ug $= \dfrac{K}{2p \cdot q} = \dfrac{60}{8 \times 3} = 2{,}5$ *bobinas por grupo*

Por tanto, al ser un devanado *por polos consecuentes* y salir el número de bobinas por polo y fase y el número de bobinas por grupo, entero más media unidad, deberá ejecutarse como mixto. En este caso se ejecutará con grupos de distinto número de bobinas; o sea, grupos de dos y de tres bobinas alternativamente:

$Ug_1 = 2$ y $Ug_2 = 3$. Podrían realizarse también todos los grupos con dos bobinas y media, colocando dos medias bobinas en una misma ranura.

Calculamos ahora la amplitud de grupo, que será distinto para los grupos de dos o de tres bobinas, pudiendo determinar así el ancho de cada bobina:

Amplitud de grupo: $m_1 = (q - 1)\, Ug_1 = (3 - 1)\, 2 = 4$ *ranuras libres*

Amplitud de grupo: $m_2 = (q - 1)\, Ug_2 = (3 - 1)\, 3 = 6$ *ranuras libres*

Por último, determinamos la distancia entre principios de fases y elaboramos la tabla correspondiente:

Distancia entre principios de fases: $Yq = \dfrac{K}{3p} = \dfrac{60}{3 \times 4} = 5$ *ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	6	11
16	21	26
31	36	41
46	51	56

Para dibujar el esquema correspondiente (figura 8.5) tomaremos como entradas de fases las ranuras: 1, 6 y 11, aunque podríamos haber tomado cualquieras otras de la tabla, siempre que fuera una de cada columna, tal como se describió en el capítulo 5 de esta obra.

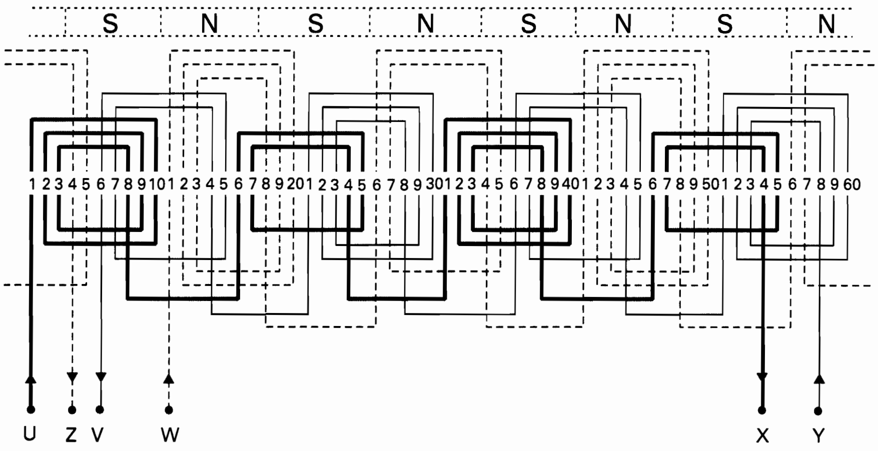


Figura 8.5. Esquema del devanado concéntrico, trifásico, octapolar, ejecutado por polos consecuentes, del ejemplo 8.3.

Ejemplo 8.4. Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado concéntrico trifásico, tetrapolar, para un motor de 36 ranuras, ejecutado *por polos* y a una capa.

Primeramente comprobamos que no es posible su ejecución completa, ya que, al ser un devanado *por polos,* no se cumple que el número de ranuras por polo y fase ***Kpq*** sea un número *entero y par.*

Número de ranuras por polo y fase: Kpq $= \dfrac{K}{2p \cdot q} = \dfrac{36}{4 \times 3} = 3$ *(número entero, impar)*

Calculamos a continuación el número total de grupos de bobinas:

Número de grupos de bobinas: G $= 2p \cdot q = 4 \times 3 = 12$ *grupos de bobinas*

Seguidamente calculamos el número de bobinas que tiene cada grupo:

Número de bobinas por grupo: Ug $= \dfrac{K}{4p \cdot q} = \dfrac{36}{8 \times 3} = 1{,}5$ *bobinas por grupo*

Al ser el número de ranuras por polo y fase ***Kpq*** impar y el número de bobinas por grupo **Ug** fraccionario, y deseando una ejecución *por polos*, no se puede hacer un devanado completo, sino que ha de ser mixto. En este caso se ejecutará con medias bobinas, o sea, cada grupo de bobinas se ejecutará con la bobina exterior de la mitad de espiras que la otra y estas medias bobinas se colocarán dos a dos, de la misma fase, en una misma ranura, en dos capas superpuestas. También podría ejecutarse como el del ejemplo anterior, con grupos desiguales de una y dos bobinas.

Calculamos ahora la amplitud de grupo, para determinar el ancho de cada bobina:

Amplitud de grupo: m $= (q - 1)\, 2\, Ug = (3 - 1)\, 2 \times 1{,}5 = 6$ *ranuras libres*

Por último, determinamos la distancia entre principios de fases y elaboramos la tabla correspondiente:

Distancia entre principios de fases: Yq $= \dfrac{K}{3p} = \dfrac{36}{3 \times 2} = 6$ *ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	7	13
19	25	31

Para dibujar el esquema correspondiente (figura 8.6) tomaremos como entradas de fases las ranuras: 1, 7 y 13. Las ranuras a doble capa son: 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31 y 34.

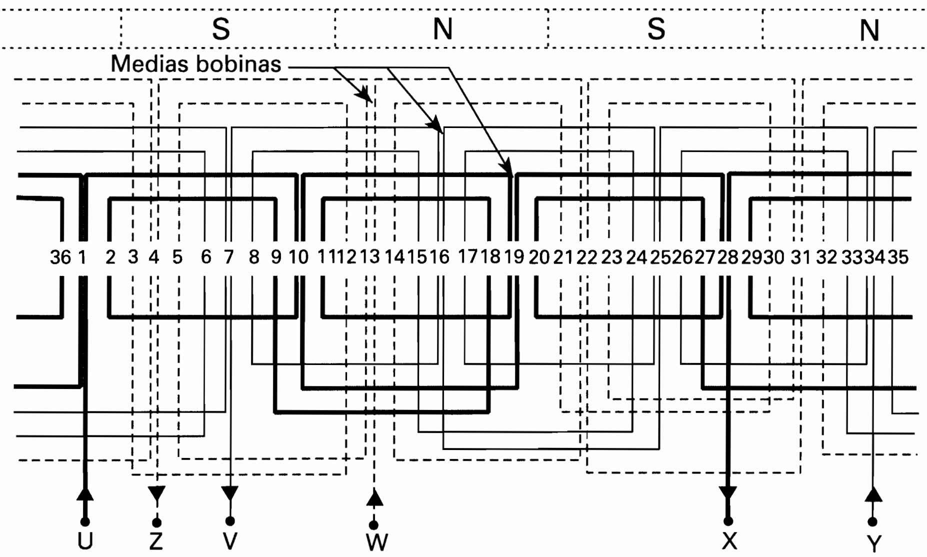


Figura 8.6. Esquema del devanado concéntrico, trifásico, tetrapolar, ejecutado por polos, del ejemplo 8.4.

8.2. DEVANADOS IMBRICADOS, TRIFÁSICOS

Se dice que **un devanado es excéntrico** cuando todas sus bobinas son iguales, tal como ocurre en los devanados de inducido de corriente continua. Como ya se mencionó al comienzo de este capítulo, los devanados excéntricos pueden ser:

- **Imbricados** (enteros y fraccionarios).
  - De una capa por ranura.
  - De dos capas por ranura.
- **Ondulados** (enteros y fraccionarios).

Los devanados excéntricos, por lo general, son ejecutados ***por polos***, por tanto cada fase tendrá tantos grupos de bobinas como polos tiene la máquina (***Gf* = *2p***).

Un devanado excéntrico es **imbricado**, cuando al ejecutarlo se avanza por una cara de la armadura y se retrocede a continuación por la otra cara, de igual forma que en los devanados imbricados de corriente continua, tal como se aprecia en la figura 8.7. Los devanados imbricados son los más utilizados en estatores de corriente alterna, debido a que solamente utilizan un tipo de bobinas, facilitando así su construcción, bien sea haciendo éstas una a una, sobre un molde único, o bien haciéndolas por grupos de bobinas, sobre un molde múltiple.

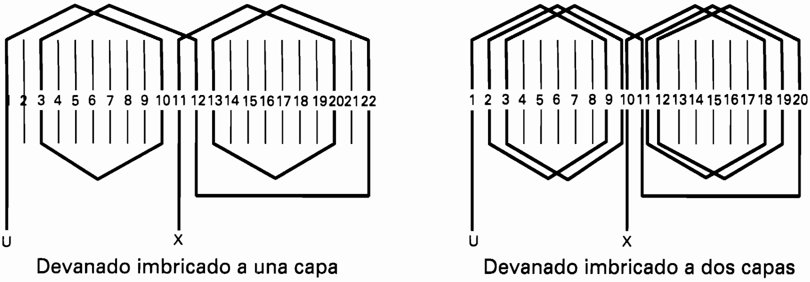


Figura 8.7. Ejecución de devanados imbricados.

Los devanados imbricados a su vez pueden ser: ***enteros*** o ***fraccionarios***, según cuál sea el valor del número de bobinas por grupo ***Ug*** que tengan. Un devanado imbricado es ***entero*** cuando se cumple que el número de bobinas por grupo es un valor entero, por el contrario cuando este valor es fraccionario, el devanado será imbricado ***fraccionario***. Según se describió en el apartado 5.2 de esta obra, y atendiendo al tipo de devanado elegido, su valor, para devanados ejecutados *por polos* será:

- ***Devanado imbricado de dos capas: Ug*** $= \frac{B}{G} = \frac{K}{2p \cdot q}$ = *valor entero o fraccionario*
- ***Devanado imbricado de una capa: Ug*** $= \frac{B}{G} = \frac{K}{4p \cdot q}$ = *valor entero o fraccionario*

Seguidamente pasamos a describir los devanados imbricados, comenzando por los ejecutados enteros y a una capa, para pasar a continuación a los enteros de dos capas y a los fraccionarios.

Definición y proceso de cálculo de devanados imbricados enteros y a una capa

En los devanados imbricados ejecutados a una capa, como cada bobina ha de ocupar dos ranuras completas, veremos que los dos lados activos de cada bobina han de ocupar una ranura par y otra impar. Por tanto, la mejor forma de que se cumpla esta condición es que el paso de ranura o ancho de bobina ***Yk*** tenga un **valor impar**.

Por tanto, para que se cumpla la condición anterior, y teniendo en cuenta que el paso de ranura debe ser, aproximadamente, igual al paso polar, en la práctica debemos tener siempre muy en cuenta que:

- En devanados de una capa, trifásicos, **con paso polar impar**, se elegirá un ancho de bobina o paso de ranura ***Yk***, igual al paso polar.
- En devanados de una capa, trifásicos, **con paso polar par**, se elegirá un ancho de bobina o paso de ranura ***Yk***, igual al paso polar acortado en un número impar de ranuras.

A continuación pasamos a detallar el proceso y orden a seguir para el cálculo y posterior dibujado del esquema de este tipo de **devanados imbricados de una capa.**

Para ello, partimos de los datos necesarios como: número de ranuras de la armadura ***K***, número de polos ***(2p)*** y número de fases (***q***). Teniendo además en cuenta que, por ser el *devanado por polos y a una capa*, el número de bobinas será la mitad del número de ranuras (***B = K / 2***), el número de grupos de bobinas por fase ha de ser igual al número de polos de la máquina (***Gf = 2p***) y el número total de grupos (***G = 2p · q***), seguiremos el proceso de cálculo siguiente:

1. Primeramente se determinará el número de bobinas que forman un grupo ***Ug*** y que, como ya mencionamos que este tipo de devanados se ejecutan siempre por polos, lo obtendremos de la fórmula siguiente:

   – ***Número de bobinas por grupo:*** $Ug = \dfrac{B}{G} = \dfrac{K}{4p \cdot q} =$ *bobinas*

2. Seguidamente se determinará el **ancho de bobina** o paso de ranura ***Yk***, de igual forma que para un devanado de corriente continua. Teniendo en cuenta que si éste resulta par, hemos de acortarlo en un número impar de unidades para que resulte un valor **impar:**

   – ***Paso de ranura o ancho de bobina:*** $Yk = \dfrac{K}{2p} =$ *ranuras (valor impar)*

3. A continuación se determina la **distancia entre principios de fase *Yq*** y se realiza la tabla de entradas correspondiente. Por ser un devanado trifásico su valor será:

   – ***Distancia entre principios de fases:*** $Yq = \dfrac{K}{3p} =$ *ranuras*

4. Por último, empleando los valores anteriormente obtenidos, se procede al dibujo del esquema completo del devanado. Pero para ello se debe tener en cuenta que:

   – Los lados activos de una misma fase, dirigidos en el mismo sentido, deben agruparse en número igual al de bobinas por grupo ***Ug***.

   – Los lados activos situados en ranuras sucesivas (par e impar) deben tener sus cabezas dirigidas en sentido contrario.

– Como este tipo de devanados se ejecuta generalmente por polos, los grupos de bobinas de una misma fase se unirán entre sí: *final con final* y *principio con principio*.

Seguidamente se realizarán dos ejemplos prácticos, de cálculo y dibujado posterior del esquema de un *devanado imbricado, a una capa*, para un motor trifásico.

Ejemplo 8.5. Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado imbricado, bipolar, para un motor asíncrono trifásico de 36 ranuras, ejecutado *por polos* y a una capa.

Al ser un devanado ejecutado *por polos y a una capa*, el número de bobinas y de grupos de bobinas será:

– ***Número de bobinas: B*** $= \frac{K}{2} = \frac{36}{2} = 18$ *bobinas;*

– ***Grupos de bobinas por fase: Gf*** $= 2p = 2$ *grupos*

Calculamos, a continuación, el número de bobinas por grupo:

– ***Número de bobinas por grupo: Ug*** $= \frac{K}{4p \cdot q} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$ *bobinas por grupo*

Seguidamente determinamos el paso de ranura o ancho de bobina, que debería ser impar:

– ***Paso de ranura o ancho de bobina: Yk*** $= \frac{K}{2p} = \frac{36}{2} = 18$ *ranuras*

Como el valor del paso de ranura ha salido par, debe acortarse en un número impar de ranuras (1, 3, 5, etc.). En este caso y como ejemplo extremo lo acortamos en cinco unidades; tomando, por tanto, ***Yk = 13 ranuras*** para el trazado del esquema y posterior ejecución del devanado.

Por último, calculamos la distancia entre principios de fases y realizamos la tabla de entradas correspondiente:

– ***Distancia entre principios de fases: Yq*** $= \frac{K}{3p} = \frac{36}{3 \times 1} = 12$ *ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	13	25

Con todos estos datos, ya se puede dibujar el esquema completo, que es el correspondiente a la figura 8.8.

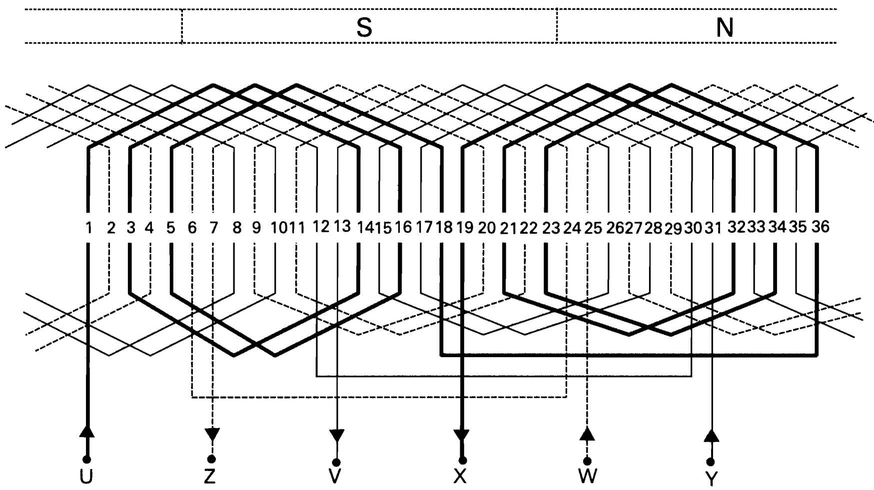


Figura 8.8. Esquema del devanado imbricado, trifásico, bipolar, ejecutado por polos y a una capa, del ejemplo 8.5

Ejemplo 8.6. Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado imbricado, exapolar, para un motor asíncrono trifásico de 36 ranuras, ejecutado *por polos* y a una capa.

Al ser un devanado ejecutado *por polos y a una capa*, el número de bobinas y de grupos de bobinas será:

– ***Número de bobinas:*** $B = \frac{K}{2} = \frac{36}{2} = 18$ *bobinas;*

– ***Grupos de bobinas por fase:*** $Gf = 2p = 6$ *grupos*

Calculamos, a continuación, el número de bobinas por grupo:

– ***Número de bobinas por grupo:*** $Ug = \frac{K}{4p \cdot q} = \frac{36}{4 \times 3 \times 3} = 1$ *bobinas por grupo*

Seguidamente determinamos el paso de ranura o ancho de bobina, que debería ser impar:

– ***Paso de ranura o ancho de bobina:*** $Yk = \frac{K}{2p} = \frac{36}{6} = 6$ *ranuras*

Como el valor del paso de ranura ha salido par, debe acortarse en un número impar de ranuras (1, 3, 5, etc.). En este caso lo acortamos en una unidad; tomando, por tanto, ***Yk = 5 ranuras***.

Por último calculamos la distancia entre principios de fases y realizamos la tabla de entradas correspondiente:

– ***Distancia entre principios de fases:*** $Yq = \dfrac{K}{3p} = \dfrac{36}{3 \times 3} = 4$ *ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	5	9
13	17	21
25	29	33

Con todos estos datos, ya se puede dibujar el esquema completo, que es el correspondiente a la figura 8.9, en el que hemos tomado como entradas de fase las ranuras 1, 5 y 9.

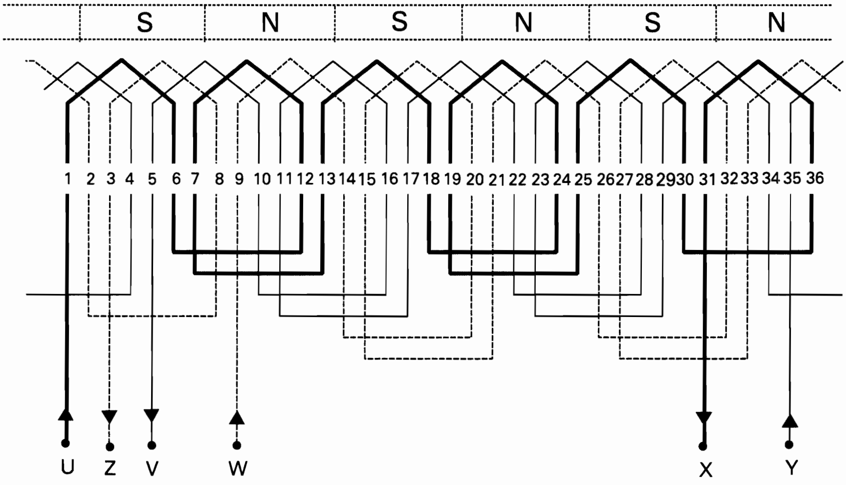


Figura 8.9. Esquema del devanado imbricado, trifásico, exapolar, ejecutado por polos y a una capa, del ejemplo 8.6.

Definición y proceso de cálculo de devanados imbricados enteros y a dos capas

En este tipo de devanado imbricado de corriente alterna, como su propio nombre indica, cada ranura será ocupada por los lados activos de dos bobinas distintas

(dos capas o bobinas por ranura), según se aprecia en la figura 8.7 y, por tal motivo, el número total de bobinas del devanado es el mismo que el número de ranuras de la armadura (***B*** = ***K***). Por tanto, el valor del número de bobinas por grupo se calculará ahora a partir de estos nuevos valores:

– ***Número de bobinas por grupo: Ug*** $= \dfrac{B}{G} = \dfrac{K}{2p \cdot q} =$ *bobinas*

Al no tener que dejar ninguna ranura libre mientras se va ejecutando el devanado, tampoco existe ninguna limitación que condicione el valor del ancho de bobina, siendo éste ***(Yk = K / 2p)***; que puede ser acortado en cualquier número de ranuras. Sobretodo se suele hacer en los devanados bipolares, para reducir el ancho de las bobinas, facilitando así su colocación.

Este tipo de devanados imbricados a dos capas también se ejecuta siempre ***por polos***, al igual que los de una capa.

Como entre las dos bobinas superpuestas en una misma ranura puede haber una considerable diferencia de potencial, ya sean éstas de la misma o distinta fase, en la ejecución práctica del devanado hay que extremar el aislamiento entre una y otra capa del devanado.

El proceso de cálculo a seguir con este tipo de devanados es el mismo que para los devanados imbricados de una capa, aunque partiendo para el cálculo de doble número de bobinas (***B*** = ***K***), que condiciona el número de bobinas por grupo ***Ug***, como ya se mencionó más arriba y, por tanto, no lo describiremos de nuevo. Nos limitaremos a realizar dos ejemplos prácticos, para dar por terminado este tema, de los *devanados imbricados, ejecutados a dos capas* por ranura.

Ejemplo 8.7. Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado imbricado, tetrapolar, para un motor asíncrono trifásico de 36 ranuras, ejecutado *por polos* y a dos capas.

Al ser un devanado ejecutado *por polos y a dos capas*, el número de bobinas y de grupos de bobinas será:

– ***Número de bobinas: B*** = *K = 36 bobinas;*

– ***Grupos de bobinas por fase: Gf*** = *2p = 4 grupos*

Calculamos, a continuación, el número de bobinas por grupo:

– ***Número de bobinas por grupo: Ug*** $= \dfrac{K}{2p \cdot q} = \dfrac{36}{4 \times 3} =$ *3 bobinas por grupo*

Seguidamente determinamos el paso de ranura o ancho de bobina que, como ya describimos, en estos devanados a dos capas puede ser par o impar:

– ***Paso de ranura o ancho de bobina:*** $Yk = \dfrac{K}{2p} = \dfrac{36}{4} = 9$ *ranuras*

En este caso, para que las bobinas nos salgan más cortas y sea más fácil su ejecución, lo acortamos en tres unidades; tomando, por tanto, ***Yk = 6 ranuras***.

Por último, calculamos la distancia entre principios de fases y realizamos la tabla de entradas correspondiente:

– ***Distancia entre principios de fases:*** $Yq = \dfrac{K}{3p} = \dfrac{36}{3 \times 2} = 6$ *ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	7	13
19	25	31

Con todos estos datos, ya se puede dibujar el esquema completo, que es el correspondiente a la figura 8.10, en el que hemos tomado como entradas de fase las ranuras 1, 7 y 13.

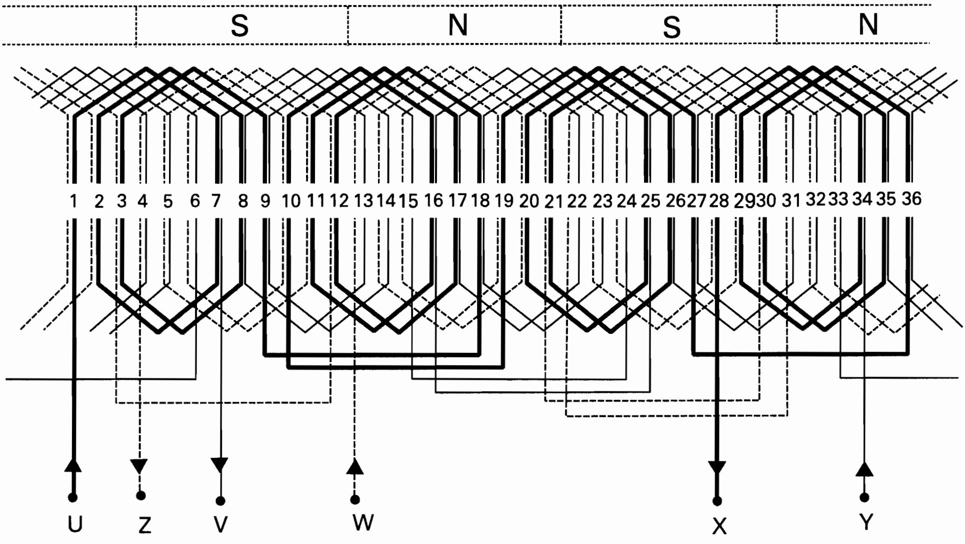


Figura 8.10. Esquema del devanado imbricado, trifásico, tetrapolar, ejecutado por polos y a dos capas, del ejemplo 8.7.

Ejemplo 8.8. Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado imbricado, bipolar, para un motor asíncrono trifásico de 24 ranuras, ejecutado *por polos* y a dos capas.

Al ser un devanado ejecutado *por polos y a dos capas*, el número de bobinas y de grupos de bobinas será:

– ***Número de bobinas: B*** = *K* = *24 bobinas;*

– ***Grupos de bobinas por fase: Gf*** = *2p* = *2 grupos*

Calculamos, a continuación, el número de bobinas por grupo:

– ***Número de bobinas por grupo:*** $Ug = \dfrac{K}{2p \cdot q} = \dfrac{24}{2 \, x \, 3} =$ *4 bobinas por grupo*

Seguidamente determinamos el paso de ranura o ancho de bobina que, como ya describimos, en estos devanados a dos capas puede ser par o impar:

– ***Paso de ranura o ancho de bobina:*** $Yk = \dfrac{K}{2p} = \dfrac{24}{2} =$ *12 ranuras*

En este caso, al ser el devanado bipolar, para que las bobinas nos salgan más cortas y sea más fácil su ejecución, lo acortamos en dos unidades; tomando, por tanto, ***Yk = 10 ranuras***.

Por último calculamos la distancia entre principios de fases y realizamos la tabla de entradas correspondiente:

– ***Distancia entre principios de fases:*** $Yq = \dfrac{K}{3p} = \dfrac{24}{3 \, x \, 1} =$ *8 ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	9	17

Con todos estos datos, ya se puede dibujar el esquema completo, que es el correspondiente a la figura 8.11, en el que hemos tomado como entradas de fase las únicas ranuras posibles: 1, 9 y 17.

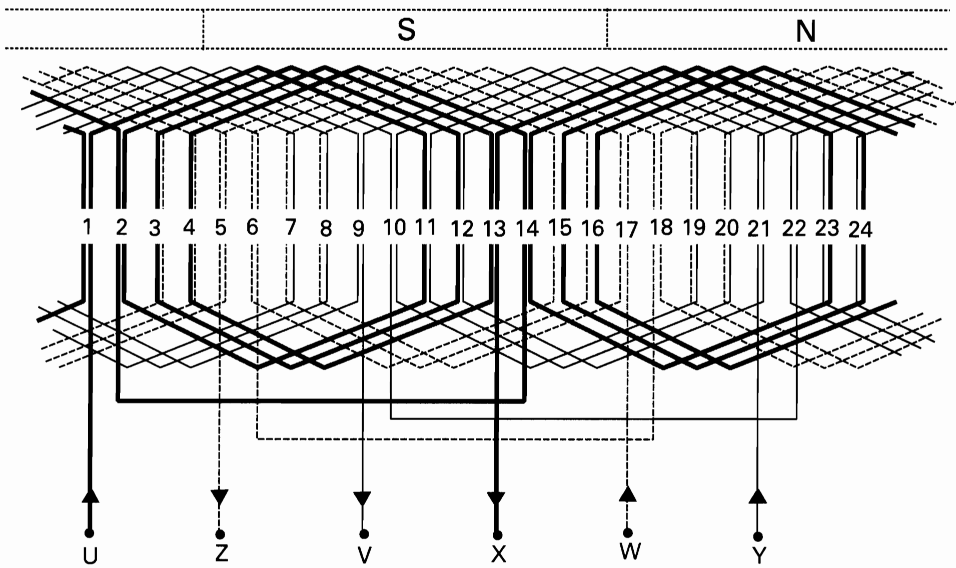


Figura 8.11. Esquema del devanado imbricado, trifásico, bipolar, ejecutado por polos y a dos capa, del ejemplo 8.8.

Definición y proceso de cálculo de devanados imbricados fraccionarios regulares

Un devanado imbricado es fraccionario cuando el número de bobinas por grupo ***Ug*** no es un número entero.

$$- \textbf{\textit{Número de bobinas por fase: Ug}} = \frac{B}{G} = \frac{B}{2p \cdot q} = \textit{número fraccionario}$$

Al obtener un valor fraccionario, al igual que ocurría en los devanados concéntricos mixtos con su número de ranuras por polo y fase, debemos comprender que lo que realmente significa esta expresión fraccionaria es que los grupos sucesivos de bobinas de una misma fase no tendrán todos el mismo número de bobinas, sino que algunos grupos tendrán una bobina más que los otros.

Si, por ejemplo, nos sale ***Ug = 3,5***, quiere decir que los grupos de bobinas de cada fase tendrán alternativamente tres y cuatro bobinas. También hemos de tener presente que cuando el resultado no es un número entero más media unidad (por ejemplo: 1,3; 3,6; etc.), no tienen que ser la mitad de los grupos con una bobina más que los otros, sino que será distinto el número de grupos grandes y pequeños de bobinas, ya que su valor dependerá de la fracción obtenida.

Estos devanados, *imbricados fraccionarios regulares*, se pueden realizar a una o dos capas por ranura y se ejecutan *por polos* generalmente. Se emplean con preferencia en la construcción de alternadores ya que, cuando están perfectamente diseñados, se consigue una fuerza electromotriz lo más aproximada posible a una curva senoidal y un ángulo de desfase más preciso.

Los devanados fraccionarios pueden ser *regulares o simétricos* y también *irregulares o asimétricos*, dependiendo de que las fuerzas electromotrices de sus distintas fases sean exactamente iguales y estén desfasadas el ángulo característico del sistema, como ocurrirá en el caso de los simétricos o que sus fuerzas electromotrices y ángulos de desfase no sean exactamente iguales, como ocurre en los asimétricos. Los devanados fraccionarios asimétricos son complicados y difíciles de ejecutar, por lo cual deben evitarse siempre que sea posible.

Debido a lo anteriormente expuesto, no siempre es posible que todos los grupos tengan el mismo número de bobinas y tampoco es posible distribuir estos grupos de forma arbitraria, sino que debe hacerse con una cierta uniformidad o simetría. En los devanados fraccionarios regulares o simétricos, se pueden distribuir estos grupos de bobinas lo más simétricamente posible, empleando lo que denominamos *grupos de repetición*. Los ***grupos de repetición GR*** son conjuntos formados por grupos de bobinas que se repiten una o más veces en cada fase a lo largo del devanado.

Para que un devanado fraccionario pueda ser perfectamente ejecutado, ha de cumplir con ciertas **condiciones de simetría**, como son que el número total de bobinas del devanado ***B***, dividido por la denominada ***constante propia CP***, valor que depende del número de polos y de fases de la máquina, nos dé por resultado un número entero. La tabla 8.1 nos da las posibilidades de ejecución para conseguir una perfecta simetría, en cuanto a la distribución de los grupos de bobinas, en función del tipo de máquina y su constante propia.

– ***Condiciones de simetría:*** $\frac{B}{CP} = \textit{número entero}$

TABLA 8.1. Condiciones de simetría, en los devanados imbricados fraccionarios.

Nº de polos (2p)	Constante propia *CP*	
	Bifásica	**Trifásica**
2	4	3
4	8	3
6	4	9
8	16	3
10	4	3
12	8	9
14	4	3

Seguidamente pasaremos a calcular este tipo de devanados, *fraccionarios y regulares*, labor mucho más compleja que para los devanados imbricados enteros. Hemos de tener presente que, debido a la complejidad que el mismo podría alcanzar en algunos devanados, emplearemos para ello un **método simplificado de cálculo** –basado en el denominado método del mínimo común múltiplo–, pero que puede ser suficiente en la mayoría de los casos que se nos presenten.

El proceso a seguir, partiendo del número de ranuras ***K***, del número de bobinas totales ***B*** (para ver si el devanado es a una o dos capas), del número de polos ***2p*** y fases ***q***, y del sistema de ejecución (por polos generalmente) es el siguiente:

1. Se comienza por calcular el paso de ranura o ancho de bobina ***Yk.*** Éste también suele ser acortado, como en los devanados imbricados enteros ya que, sobre todo en los devanados de generadores, este acortamiento facilita la perfección de la onda senoidal, de la **f.e.m.** obtenida:

   – ***Paso de ranura:*** $Yk = \dfrac{K}{2p} = ranuras$

2. A continuación se determina el número de bobinas por grupo ***Ug,*** partiendo siempre de la fórmula general utilizada para los devanados *por polos y a dos capas*. No obstante, por partir del número de bobinas ***B***, en vez del número de ranuras ***K***, esta misma fórmula también es válida para los devanados de una capa.

   – ***Número de bobinas por grupo:*** $Ug = \dfrac{B}{2p \cdot q} = \text{número fraccionario}$

   Al no salir el número de bobinas por grupo un valor entero, se observa inmediatamente que se trata de un devanado fraccionario, por tanto, procederemos seguidamente a verificar sus condiciones de simetría o posibilidad de ejecución (***B / CP*** *= número entero*), como ***devanado imbricado fraccionario regular o simétrico***, por medio de la tabla 8.1, para más adelante poder preparar un cuadro de distribución de grupos de bobinas.

3. De los resultados del número fraccionario de bobinas por grupo ***Ug***, obtenidos en el punto anterior, y como paso previo a la distribución de los grupos de bobinas que componen cada fase, prepararemos la expresión en forma de número mixto:

   – ***Número de bobinas por grupo:*** $Ug = \dfrac{B}{2p \cdot q} = E + \dfrac{D}{d}$

   Expresión final, cuyos términos interpretamos de la forma siguiente:

   E = Número de bobinas que forman un grupo pequeño.

   E + 1 = Número de bobinas que forman un grupo grande.

D = Número de grupos grandes de bobinas, por cada grupo de repetición *GR* y fase.

d - ***D*** = Número de grupos pequeños de bobinas, por cada grupo de repetición *GR* y fase.

4. Con los resultados de la expresión anterior, y al indicarnos el valor del divisor (***d***) el número de grupos polares que forma cada grupo de repetición, ya se puede calcular el número de grupos de repetición ***GR*** que tendrá el devanado fraccionario:

   – ***Número de grupos de repetición del devanado: GR*** $= \dfrac{2p}{d}$

5. A continuación se procederá a la distribución de los grupos de bobinas, a lo largo de todo el devanado, por cada grupo de repetición ***GR***, bien sea, aplicando las definiciones del punto tres (valores: ***E, E + 1, D*** y ***d***), o más fácilmente ayudándonos de la tabla 8.2, que ha sido obtenida por el mismo método, y en la cual por cada valor del número de bobinas por grupo ***Ug,*** se representa un grupo de repetición. El resto de grupos de repetición del devanado serán iguales al primero.

   Para la interpretación de la tabla 8.2, vemos que, en la primera columna tenemos el valor del número de bobinas por grupo obtenido por cálculo, según el apartado dos, en la forma fraccionaria: ***Ug = E*** + (***D / d***), una vez reducida la fracción a su mínima expresión. En las restantes columnas y a continuación del valor que representa ***Ug***, vemos el número de bobinas y la distribución de las mismas que ha de tener cada grupo de repetición ***GR***, estando éstas ya asignadas a las tres fases, que denominamos **A, B y C**.

   Recordamos una vez más que: cuando al seguir la tabla encontramos ***E***, quiere decir que ese grupo polar tendrá tantas bobinas como indica la parte entera de la expresión fraccional del número de bobinas por grupo ***Ug***. La expresión ***E + 1*** nos indica que ese grupo tendrá una bobina más.

6. Seguidamente se calculan las distancias entre principios de fases ***Yq***, que también puede ser fraccionario; por lo cual una vez confeccionada la tabla se elegirá la combinación de principios más conveniente.

   – ***Distancia entre principios de fases: Yq*** $= \dfrac{K}{3p}$ = *ranuras*

7. Por último, con los datos obtenidos, dibujamos el esquema de acuerdo con la distribución de bobinas deducida del cálculo para los grupos de repetición y teniendo en cuenta que al ser ejecutado *por polos*, los grupos de bobinas de las diferentes fases se irán conectando entre sí: *final con final* y *principio con principio*.

Ug	Primer grupo de repetición, en función de polos y de las tres fases de la máquina																							
	Grupo polar 1º			Grupo polar 2º			Grupo polar 3º			Grupo polar 4º			Grupo polar 5º			Grupo polar 6º			Grupo polar 7º			Grupo polar 8º		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
E+1/8	E+1	E	E	E	E	E	E	E	E+1	E	E	E	E	E	E	E	E+1	E	E	E	E	E	E	E
E+3/8	E+1	E	E+1	E	E	E+1	E	E	E+1	E	E+1	E	E	E+1	E	E	E+1	E	E+1	E	E	E+1	E	E
E+5/8	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E	E+1	E	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E	E+1	E	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E	E+1	E
E+7/8	E+1	E+1	E+1	E+1	E+1	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E+1	E+1	E+1	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E+1	E+1	E+1	E+1	E+1	E
E+1/5	E+1	E	E	E	E	E+1	E	E	E	E	E+1	E	E	E	E									
E+2/5	E+1	E	E+1	E	E	E+1	E	E+1	E	E	E+1	E	E+1	E	E									
E+3/5	E+1	E+1	E	E+1	E	E+1	E+1	E	E+1	E	E+1	E+1	E	E+1	E									
E+4/5	E+1	E+1	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E+1	E+1	E									
E+1/4	E+1	E	E	E	E+1	E	E	E	E+1	E	E	E												
E+3/4	E+1	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E+1	E												
E+1/2	E+1	E	E+1	E	E+1	E																		

TABLA 8.2. Formación de los grupos de repetición en los devanados fraccionarios regulares.

Para finalizar lo veremos todo de nuevo con dos ejemplos desarrollados muy minuciosamente.

Ejemplo 8.9. Calcular y dibujar el esquema de un devanado imbricado, para un motor tetrapolar, asíncrono trifásico de 36 ranuras, ejecutado *por polos* y a una capa

Al ser el devanado de una capa, el número de bobinas será la mitad del número de ranuras: ***B = K / 2 = 36 / 2 = 18 bobinas.***

Primeramente calcularemos el paso de ranura o ancho de bobina ***Yk***:

– ***Paso de ranura o ancho de bobina:*** $Yk = \dfrac{K}{2p} = \dfrac{36}{4} = 9 \text{ ranuras}$

Para una mejor ejecución del devanado acortaremos el ancho de bobina en dos unidades, quedando ***Yk = 7*** ranuras.

A continuación se determina el número de bobinas por grupo ***Ug***:

– ***Número de bobinas por grupo:*** $Ug = \dfrac{B}{2p \cdot q} = \dfrac{18}{4 \times 3} = 1{,}5 \text{ bobinas}$

Al resultar un valor fraccionario, se aprecia que el devanado no puede ser entero, por tanto, deberemos ejecutarlo como imbricado fraccionario, con las características siguientes deducidas de la fórmula anterior:

– ***Número de bobinas por grupo:*** $Ug = \dfrac{18}{12} = 1{,}5 = E + \dfrac{D}{d} = 1 + \dfrac{1}{2}$

Los términos de la expresión final de *Ug* los interpretaremos como sigue:

- Número de bobinas que tiene un grupo pequeño = ***E = 1***
- Número de bobinas que tiene un grupo grande = ***E+1 = 1+1 = 2***
- Número de grupos grandes de bobinas, por cada grupo de repetición y fase = ***D = 1***
- Número de grupos pequeños de bobinas, por cada grupo de repetición y fase = ***(d – D) = 2 – 1 = 1***

Con estos datos ya podemos calcular el número de grupos de repetición ***GR*** que tendrá el devanado:

– ***Número de grupos de repetición:*** $GR = \dfrac{2p}{d} = \dfrac{4}{2} = 2 \text{ grupos de repetición}$

Por medio de la tabla 8.1, comprobamos también que el devanado fraccionario es perfectamente ejecutable por reunir las condiciones de simetría:

– ***Condiciones de simetría:*** $\dfrac{B}{CP} = \dfrac{18}{3} = 6 = \text{número entero}$

Con los datos obtenidos del número de bobinas por grupo ***Ug = 1,5 = 1 + ½***, ya se puede proceder a la formación de los grupos de repetición, bien sea directamente o ayudados por la tabla 8.2.

- Directamente: **AA - B - CC ; A - BB - C | AA - B - CC ; A - BB - C** (dos grupos de repetición)
- Por la tabla 8.2: **E+1 - E - E+1 ; E - E+1 - E = AA - B - CC ; A - BB - C** (más otro grupo igual)

Seguidamente se calcula las distancia entre principios de fases ***Yq*** y realizamos la tabla de posibles entradas:

– ***Distancia entre principios de fases:*** $Yq = \dfrac{K}{3p} = \dfrac{36}{3 \times 2} = 6 \text{ ranuras}$

Fase U	Fase V	Fase W
1	7	13
19	25	31

Con todos estos datos ya se puede dibujar el esquema, que es el correspondiente a la figura 8.12, para el que hemos tomado como entradas de fases las ranuras: 1, 7 y 13, así como el paso de ranura ***Yk*** acortado en dos unidades, como más arriba se mencionó.

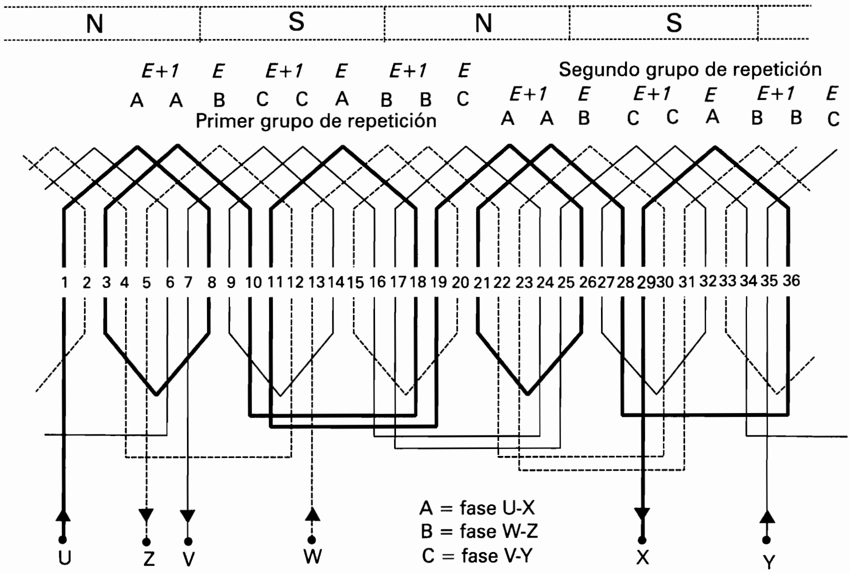


Figura 8.12. Esquema del devanado imbricado fraccionario, trifásico, tetrapolar, ejecutado por polos y a una capa, del ejemplo 8.9

Ejemplo 8.10. Calcular y dibujar el esquema de un devanado imbricado, para un motor octapolar, asíncrono trifásico de 33 ranuras, ejecutado *por polos* y a dos capas.

Al ser el devanado de dos capas, el número de bobinas será el mismo que el de ranuras: ***B = K = 33 bobinas.***

Primeramente calcularemos el paso de ranura o ancho de bobina ***Yk***:

– ***Paso de ranura o ancho de bobina:*** $Yk = \dfrac{K}{2p} = \dfrac{33}{8} = 4{,}125$ *ranuras.*

Para la correcta ejecución del devanado, acortaremos el ancho de bobina, quedando ***Yk = 4*** ranuras.

A continuación se determina el número de bobinas por grupo ***Ug***:

– ***Número de bobinas por grupo:*** $Ug = \dfrac{B}{2p \cdot q} = \dfrac{33}{8 \times 3} = 1{,}375 = (1+3/8)$ *bobinas*

Al resultar un valor fraccionario, se aprecia que el devanado no puede ser entero, por tanto, deberemos ejecutarlo como imbricado fraccionario, con las características siguientes deducidas de la fórmula anterior:

– ***Número de bobinas por grupo:*** $Ug = \dfrac{33}{24} = 1{,}375 = E + \dfrac{D}{d} = 1 + \dfrac{3}{8}$

Los términos de la expresión final los interpretaremos como sigue:

- Número de bobinas que tiene un grupo pequeño = ***E = 1***
- Número de bobinas que tiene un grupo grande = ***E+1 = 1+1 = 2***
- Número de grupos grandes de bobinas, por cada grupo de repetición y fase = ***D = 3***
- Número de grupos pequeños de bobinas, por cada grupo de repetición y fase = (***d*** - ***D***) = ***8 - 3 = 5***

Con estos datos ya podemos calcular el número de grupos de repetición ***GR***, que tendrá el devanado:

– ***Número de grupos de repetición:*** $GR = \dfrac{2p}{d} = \dfrac{8}{8} = 1$ *grupo de repetición*

Por medio de la tabla 8.1, comprobamos también que el devanado fraccionario es perfectamente ejecutable por reunir las condiciones de simetría siguientes:

– ***Condiciones de simetría:*** $\dfrac{B}{CP} = \dfrac{33}{3} = 11 =$ *número entero*

Con los datos obtenidos del número de bobinas por grupo ***Ug = 1,375 = 1 + 3/8***, ya se puede realizar la formación del único grupo de repetición GR, que tiene este devanado, bien sea directamente o ayudados por la tabla 8.2.

- Directamente: *GR* = 1 = **AA-B-CC ; A-B-CC ; A-B-CC ; A-BB-C ; A-BB-C ; A-BB-C ; AA-B-C ; AA-B-C**
- Por la tabla 8.2: **E+1-E-E+1 ; E-E-E+1 ; E-E-E+1 ; E-E+1-E ; E-E+1-E ; E-E+1-E ; E+1-E-E ; E+1-E-E = AA-B-CC ; A-B-CC ; A-B-CC ; A-BB-C ; A-BB-C ; A-BB-C ; AA-B-C ; AA-B-C**

Seguidamente se calcula las distancia entre principios de fases ***Yq*** y se realiza la tabla de entradas correspondiente:

– ***Distancia entre principios de fases: Yq*** $= \dfrac{K}{3p} = \dfrac{33}{3 \times 4} = 2{,}75$ *ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	3,75	6,5
9,25	12	14,75
17,5	20,25	23
25,75	28,5	31,25

Con todos estos datos ya se puede dibujar el esquema, que es el correspondiente a la figura 8.13, para el que hemos tomado como entradas de fases las ranuras de valor entero, que son: 1, 12 y 23, así como el paso de ranura ***Yk = 4*** acortado en 0,125 unidades, como más arriba se mencionó.

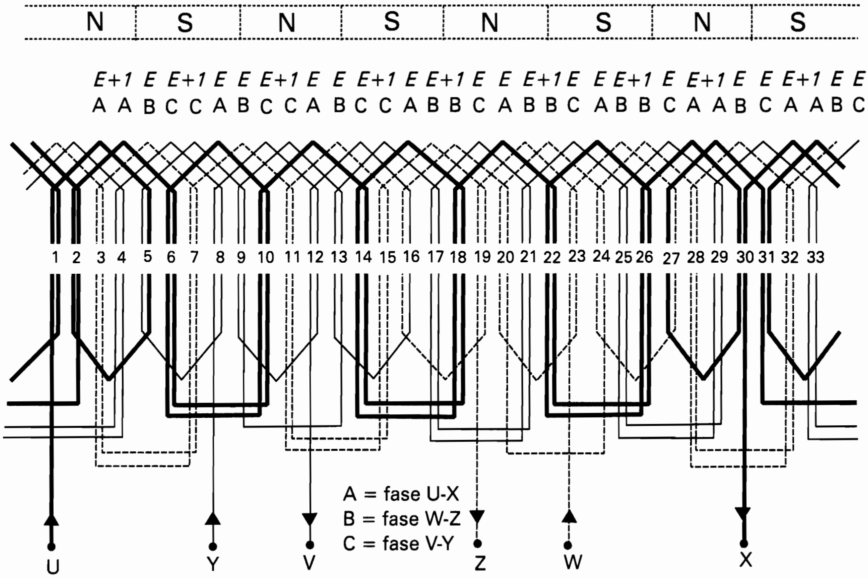


Figura 8.13. Esquema del devanado imbricado fraccionario, trifásico, octapolar, ejecutado por polos y a doble capa, del ejemplo 8.10.

Devanados imbricados fraccionarios irregulares

Cuando en un devanado fraccionario, al determinar sus condiciones de simetría, dividiendo el número de bobinas del devanado ***B*** por su constante propia ***CP***, no nos da como resultado un número entero, decimos que es un *devanado fraccionario irregular o asimétrico.*

No obstante, **en los devanados trifásicos de seis y doce polos**, en los que su número de bobinas ***B*** no es divisible por su constante propia ***CP*** (en este caso, según la tabla 8.1, *CP* = 9) pero sí son divisibles por **3**, es posible ejecutar estos devanados por medio de un *devanado imbricado irregular*, que resultará suficientemente equilibrado en su funcionamiento, tanto para motores asíncronos de jaula de ardilla como para generadores de corriente alterna.

En este tipo de devanados no es posible una distribución regular de las bobinas, por medio del método del mínimo común múltiplo, como ocurría en los devanados fraccionarios regulares. No obstante, se ha comprobado en la práctica que este tipo de máquinas, de seis y doce polos, funciona correctamente con una distribución de bobinas como la reflejada en la tabla 8.3.

TABLA 8.3. Formación de los grupos de repetición en los devanados fraccionarios irregulares, de seis y doce polos.

Primer grupo de repetición, en función del número de polos y de las tres fases de la máquina									
Ug	**Grupo polar 1°**			**Grupo polar 2°**			**Grupo polar 3°**		
	A	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
E+1/3	E+1	E	E	E	E	E+1	E	E+1	E
E+2/3	E+1	E+1	E	E+1	E	E+1	E	E+1	E+1

El proceso de cálculo de este tipo de devanados, con excepción de la distribución de las bobinas por grupo ***Ug***, para formar los grupos de repetición, cuyos valores más comunes son los de la tabla 8.3, es similar al seguido para los devanados imbricados regulares. Por tanto, no lo volveremos a repetir. El ejemplo siguiente nos terminará de aclarar este tema.

Ejemplo 8.11. Calcular y dibujar el esquema de un devanado imbricado, para una máquina exapolar, asíncrona trifásica de 30 ranuras, ejecutando su devanado *por polos* y a doble capa.

Al ser el devanado de dos capas, el número de bobinas será el mismo que el de ranuras: ***B = K = 30 bobinas.***

Primeramente calcularemos el paso de ranura o ancho de bobina ***Yk***:

– ***Paso de ranura o ancho de bobina: Yk*** $= \frac{K}{2p} = \frac{30}{6} = 5$ *ranuras*

Ejecutaremos el devanado, con este mismo paso de ranura, que es igual a su paso polar.

A continuación se determina el número de bobinas por grupo ***Ug***:

– ***Número de bobinas por grupo: Ug*** $= \frac{B}{2p \cdot q} = \frac{30}{6 \times 3} = 1{,}666 = (1 + 2/3)$ *bobinas*

Al resultar un valor fraccionario, se aprecia que el devanado no puede ser entero, por tanto, deberemos ejecutarlo como *imbricado fraccionario*, con las características siguientes deducidas de la fórmula anterior:

– ***Número de bobinas por grupo: Ug*** $= \frac{30}{18} = 1{,}666 = \mathbf{E} + \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{d}} = \mathbf{1} + \frac{\mathbf{2}}{\mathbf{3}}$

Los términos de la expresión final los interpretaremos como sigue:

- Número de bobinas que tiene un grupo pequeño = ***E = 1***
- Número de bobinas que tiene un grupo grande = ***E+1 = 1+1 = 2***
- Número de grupos grandes de bobinas, por cada grupo de repetición y fase = ***D = 2***
- Número de grupos pequeños de bobinas, por cada grupo de repetición y fase = (***d – D***) = ***3 – 2 = 1***

Con estos datos ya podemos calcular el número de grupos de repetición ***GR*** que tendrá el devanado:

– ***Número de grupos de repetición: GR*** $= \frac{2p}{d} = \frac{6}{3} = 2$ *grupos de repetición*

Pero al ir a verificar su simetría por medio de la tabla 8.1, *comprobamos que el devanado fraccionario no es regular* y simétrico por no ser entera la siguiente relación:

– ***Condiciones de simetría:*** $\frac{B}{CP} = \frac{30}{9} = 3{,}333$ = (al no ser entero el devanado no puede ser regular)

Por tanto, al ser un devanado de seis polos, ***la única posibilidad de ejecución es como devanado fraccionario irregular o asimétrico*** (recordamos que solamente es posible esto en máquinas de 6 y 12 polos). Por tanto, para la distribución correcta de las bobinas, en la formación de los grupos de repetición, hemos de hacer uso de la tabla 8.3, tomando como punto de partida el valor ***Ug = 1,666 = 1 + 2/3***.

– Directamente: $GR = 2$ = **AA - BB - C ; AA - B - CC ; A -BB - CC** (mas otro grupo de repetición igual)

- Por la tabla 8.3: **E+1 - E+1 - E ; E+1 - E - E+1 ; E - E+1 - E+1 = AA - BB - C ; AA - B - CC ; A -BB - CC** (más otro grupo igual)

Seguidamente se calcula las distancia entre principios de fases ***Yq*** y se realiza la tabla de entradas correspondiente que, en este caso, tendrá pocas posibilidades de elección ya que muchos valores no son enteros:

– ***Distancia entre principios de fases:*** $Yq = \dfrac{K}{3p} = \dfrac{30}{3 \times 3} = 3{,}333$ *ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	4,333	**7,666**
10,999	**14,332**	17,665
20,998	24,331	27,664

Con todos estos datos ya se puede dibujar el esquema, que es el correspondiente a la figura 8.14, para el que hemos tomado como entradas de fases las ranuras de valor entero más aproximadas a los valores fraccionarios obtenidos en la tabla y mejor distribuidas, como son: 1, 8 y 14.

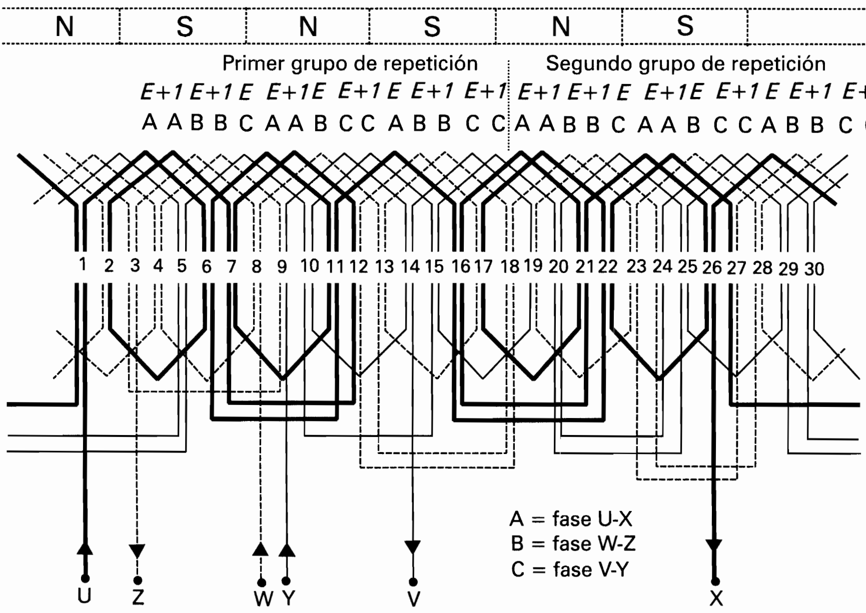


Figura 8.14. Esquema del devanado imbricado fraccionario irregular, trifásico, exapolar, ejecutado por polos y a doble capa, del ejemplo 8.11.

Devanados imbricados fraccionarios con tres bobinas muertas

Algunas veces se nos pueden presentar armaduras, con un número de ranuras tal que al realizar los cálculos para la ejecución de su devanado, se obtiene uno con las características de un devanado fraccionario irregular, pero en los que por el simple hecho de eliminar del mismo tres bobinas, **se puede conseguir ejecutar un devanado imbricado entero**. Por supuesto, este sistema solamente es realizable cuando, al eliminar las tres bobinas, con el resto ***(B-3),*** se puede conseguir un devanado imbricado entero, por resultar entero el valor del número de bobinas por grupo ***Ug***.

– ***Posibilidad de ejecución:*** $Ug = \frac{B-3}{G} = \frac{B-3}{2p \cdot q} = \textit{número entero}$

Las tres bobinas, que denominamos **bobinas muertas**, no pueden elegirse de tres ranuras cualesquiera, sino que han estar separadas unas de otras ***120° eléctricos***, y corresponder una bobina a cada fase.

Se comprende fácilmente que: cuando el número de polos de la máquina *no es múltiplo de tres*, las tres bobinas muertas se pueden colocar perfectamente separadas entre sí 120° geométricos, quedando equidistantemente distribuidas en la periferia de la armadura. Por el contrario, cuando el número de polos de la máquina *es múltiplo de tres*, la posición de las tres bobinas muertas ya no podrá ser equidistante entre sí, por lo cual se deben elegir como bobinas muertas, tres bobinas, una de cada fase, lo más equidistantemente posible entre sí. Una buena forma de conseguir una distribución lo más simétrica y equidistante posible de estas bobinas muertas, cuando el número de polos no es múltiplo de tres, es la de elegir como principios de fases, tres ranuras lo más equidistante posibles en la periferia de la armadura y, si el devanado es a doble capa, elegir como bobinas muertas tres que coincidan con las ranuras de principio de fases.

La inserción o no de las tres bobinas muertas en la armadura de la máquina siempre puede ser discutible, ya que no se conectan y no cumplen función eléctrica alguna. No obstante, es recomendable colocarlas siempre que el devanado corresponda a una armadura giratoria o rotor, con el fin de conseguir un mejor equilibrio dinámico de éste. Por el contrario, cuando el devanado no es giratorio, por corresponder a un estator de motor o generador, puede prescindirse de ellas, pero colocando en su lugar, dentro de las ranuras, un relleno apropiado, de material aislante, para la perfecta sujeción del devanado.

A continuación veremos dos ejemplos de cálculo y distribución de bobinas de este tipo de devanados. Uno de ellos es tetrapolar y, por tanto, no es múltiplo de tres, mientras que el otro es exapolar y, por tanto, múltiplo de tres, lo que como ya hemos dicho influye en la disposición de las bobinas muertas.

Ejemplo 8.12. Calcular y dibujar el esquema de un devanado imbricado, para una máquina tetrapolar, asíncrona trifásica, de 39 ranuras, ejecutando *por polos* y a doble capa.

Al ser el devanado de dos capas, en principio, el número de bobinas debería ser el mismo que su número de ranuras: ***B = K = 39 bobinas.***

Primeramente calcularemos el paso de ranura o ancho de bobina ***Yk***:

– ***Paso de ranura o ancho de bobina:*** $Yk = \dfrac{K}{2p} = \dfrac{39}{4} = 9{,}75 \text{ ranuras}$

Para la mejor ejecución del devanado, lo realizaremos con un paso de bobina acortado de ***Yk = 7*** ranuras.

A continuación se determina el número de bobinas por grupo ***Ug***:

- ***Número de bobinas por grupo:*** $Ug = \dfrac{B}{2p \cdot q} = \dfrac{39}{4 \times 3} = 3{,}25$ *bobinas (valor fraccionario)*

Al resultar un valor fraccionario, se aprecia que el devanado no puede ser imbricado entero, por tanto, deberemos, ejecutarlo como imbricado fraccionario. No obstante, **si le quitamos tres bobinas o las dejamos muertas,** puede ser perfectamente ejecutado como *devanado imbricado entero* ya que, de este modo, conseguimos un número de bobinas por grupo de valor entero, como vemos a continuación:

– ***Número de bobinas por grupo:*** $Ug = \dfrac{B - 3}{2p \cdot q} = \dfrac{39 - 3}{4 \times 3} = 3$ *bobina por grupo (valor entero)*

Seguidamente se calcula las distancia entre principios de fases ***Yq*** y se realiza la tabla de entradas correspondiente.

– ***Distancia entre principios de fases:*** $Yq = \dfrac{K}{3p} = \dfrac{39}{3 \times 2} = 6{,}5 \text{ ranuras}$

Fase U	Fase V	Fase W
1	7,5	14
20,5	27	33,5

Con todos estos datos ya se puede dibujar el esquema, que es el correspondiente a la figura 8.15, para el que hemos tomado como entradas de fases las tres ranuras con valor entero: 1, 14 y 27. Las bobinas muertas pueden ser distribuidas a 120° geométricos, por no ser el número de polos de la máquina múltiplo de tres y, por tanto, se distribuirán separadas entre sí esta distancia y tomando una de cada fase:

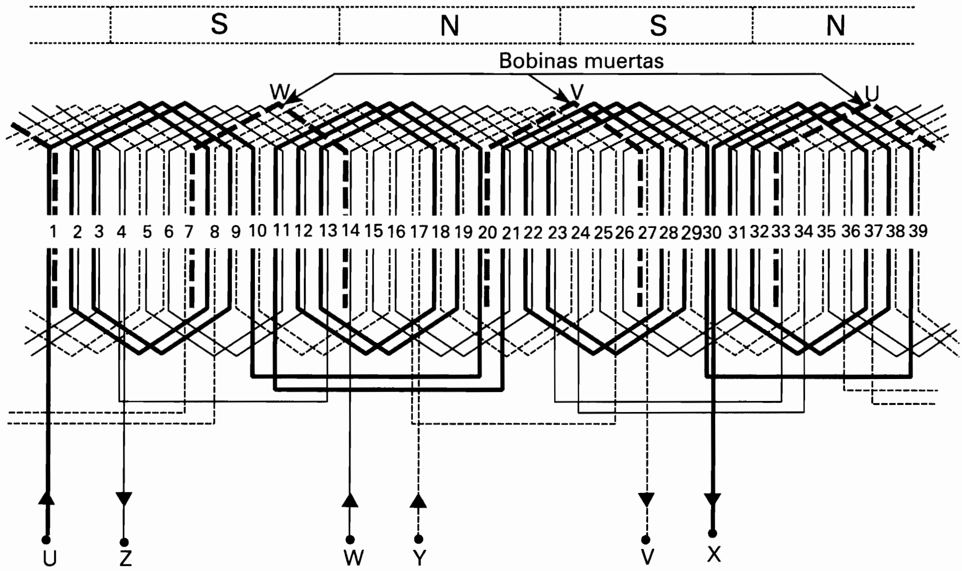


Figura 8.15. Esquema del devanado imbricado fraccionario, trifásico, tetrapolar, convertido en entero por medio de tres bobinas muertas, ejecutado por polos y a doble capa, del ejemplo 8.12

Ejemplo 8.13. Calcular y dibujar el esquema de un devanado imbricado, para una máquina exapolar, asíncrona trifásica de 21 ranuras, ejecutando su devanado *por polos* y a doble capa.

Al ser el devanado de dos capas, el número de bobinas será el mismo que el de ranuras: ***B = K = 21 bobinas.***

Primeramente calcularemos el paso de ranura o ancho de bobina ***Yk***:

– ***Paso de ranura o ancho de bobina:*** $Yk = \dfrac{K}{2p} = \dfrac{21}{6} = 3{,}5$ *ranuras*

Ejecutaremos el devanado, con un paso de bobina acortado de ***Yk = 3*** ranuras.

A continuación se determina el número de bobinas por grupo ***Ug***:

– ***Número de bobinas por grupo:*** $Ug = \dfrac{B}{2p \cdot q} = \dfrac{21}{6 \times 3} = 1{,}166$ *bobinas (valor fraccionario)*

Al resultar un valor fraccionario, se aprecia que el devanado no puede ser imbricado entero, por tanto, deberemos ejecutarlo como imbricado fraccionario. No obstante, **si le quitamos tres bobinas o las dejamos muertas,** puede ser perfectamente ejecutado como *devanado imbricado entero* ya que, de este modo, conseguimos un número de bobinas por grupo de valor entero, como se ve a continuación:

– ***Número de bobinas por grupo:** Ug* $= \frac{B - 3}{2p \cdot q} = \frac{21 - 3}{18} =$ *1 bobina por grupo (valor entero)*

Seguidamente se calcula las distancia entre principios de fases ***Yq*** y se realiza la tabla de entradas correspondiente que, en este caso, tendremos pocas posibilidades de elegir para ello valores enteros, ya que la mayoría de los valores obtenidos son fraccionarios:

– ***Distancia entre principios de fases:** Yq* $= \frac{K}{3p} = \frac{21}{3 \times 3} =$ *2,333 ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	**3,333**	**5,666**
7,999	10,332	12,665
14,998	17,331	19,664

Con todos estos datos ya se puede dibujar el esquema que es el correspondiente a la figura 8.16, para el que hemos tomado como entradas de fases las ranuras más próximas a los valores fraccionarios obtenidos en la tabla , como valor de compromiso y que son: 1, 3 y 6. Las bobinas muertas no pueden ser distribuidas a 120° geométricos, por ser el número de polos de la máquina múltiplo de tres y, por tanto, se distribuirán separadas entre sí 120° eléctricos y una por cada fase.

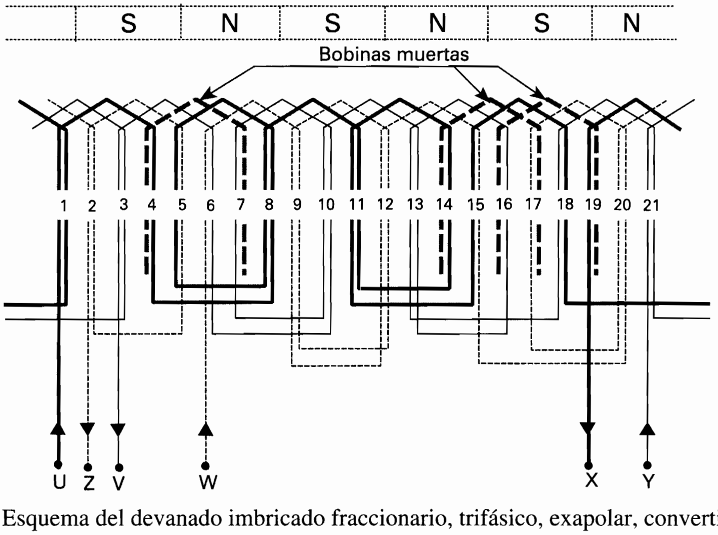


Figura 8.16. Esquema del devanado imbricado fraccionario, trifásico, exapolar, convertido en entero por medio de tres bobinas muertas, ejecutado por polos y a doble capa, del ejemplo 8.13

8.3. DEVANADOS ONDULADOS, TRIFÁSICOS

Este tipo de devanados son muy parecidos a los ondulados de corriente continua y, aunque también pueden ser empleados en bobinados estatóricos, se emplean preferentemente para la ejecución de rotores de motores asíncronos de corriente alterna, de mediana y gran potencia. Los devanados ondulados de corriente alterna se ejecutan normalmente ***por polos*** y ***a dos capas*** por ranura.

Son el tipo de devanado, de corriente alterna, menos empleado, a pesar de presentar ciertas ventajas con respecto a los concéntricos e imbricados, como son las enumeradas a continuación:

- Con este tipo de devanados se eliminan prácticamente todas las conexiones entre grupos de bobinas de una misma fase, quedando reducidas éstas a una única conexión por cada fase, denominada ***puente de retorno***, como se aprecia en la figura 8.17.
- Este tipo de devanado permite una mejor distribución de las bobinas, permitiendo así un mejor equilibrio dinámico en los devanados rotóricos.

Los devanados ondulados de corriente alterna, se ejecutan de forma similar a los de corriente continua de su mismo nombre, es decir, al recorrer la armadura se avanza tanto por una cara como por la otra, hasta completar varias vueltas a la misma para que, de esta forma, por cada polo de la máquina, se vayan formando grupos de varias bobinas, como ocurre con cualquier otro tipo de devanado.

Según se aprecia en el dibujo de la figura 8.17, donde se ha representado una sola fase de un devanado trifásico, octapolar, con dos bobinas por grupo, cada fase está formada por dos partes perfectamente diferenciadas, unidas entre sí por el *puente de retorno*. Cada una de estas dos partes recibe el nombre de ***progresiva*** o ***regresiva***, según cuál sea el sentido del avance de la misma por la periferia de la armadura, y tanto para el trazado del esquema como la ejecución del devanado puede empezarse por una u otra parte.

Según se aprecia en la figura 8.17, comenzando por la entrada de fase ***U***, se va recorriendo el devanado, en sentido progresivo, tantas veces como bobinas por grupo tenga (dos veces en este caso por tener dos bobinas por grupo), para la formación de los grupos polares impares. Seguidamente y para que los grupos polares pares queden perfectamente formados, es necesario retroceder, por medio del puente de retorno y recorrer de nuevo el devanado otras tantas veces en sentido regresivo, hasta llegar al borne de salida ***X***, ya que así la dirección de la corriente dentro de una misma ranura y grupo será la misma tanto en la parte progresiva como en la regresiva de la fase.

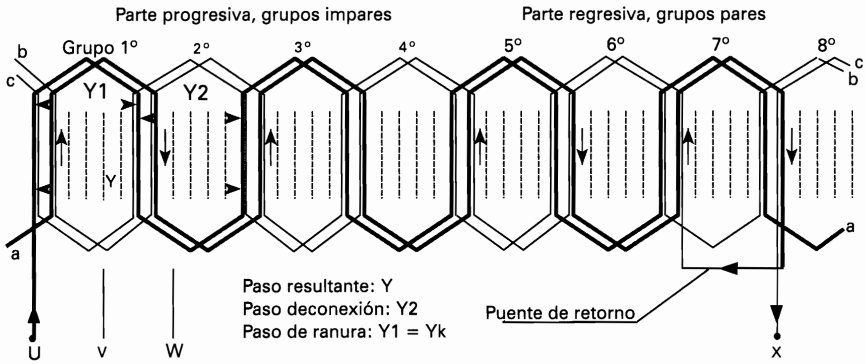


Figura 8.17. Representación simplificada de un devanado ondulado de corriente alterna.

La ejecución de los devanados ondulados solamente es posible, si el número de bobinas por grupo ***Ug*** es un número entero o entero más media unidad:

– ***Posibilidad de ejecución:*** $Ug = \dfrac{B}{2p \cdot q} = \begin{cases} \textit{número entero} \text{ (ondulado entero)} \\ \textit{número entero} + \tfrac{1}{2} \text{ (ondulado fraccionario)} \end{cases}$

En el primer caso, cuando ***(Ug = número entero)***, se obtiene un *devanado ondulado entero*, con igual número de bobinas por grupo, tanto en su parte progresiva como en la regresiva. Por el contrario, en el segundo caso, cuando ***(Ug = número entero + ½)***, se obtiene un *devanado ondulado fraccionario*, el cual tiene la particularidad de que los grupos de bobinas de la parte regresiva están formados por una bobina menos que los de la parte progresiva.

En la práctica se suelen utilizar solamente los *devanados ondulados enteros*, ya que permiten una mejor distribución de bobinas y, lo que es más importante, también permiten su ejecución con varios circuitos en paralelo –muy necesarios en máquinas de mediana y gran potencia–, por ser exactamente iguales sus partes progresiva y regresiva. Por el contrario, los devanados ondulados fraccionarios no permiten su ejecución con circuitos en paralelo, ya que no tienen, en sus dos partes, el mismo número de bobinas. En el caso de ser necesarios los devanados ondulados fraccionarios, con un solo circuito en serie, la distribución de sus grupos de bobinas debería hacerse por medio de la tabla 8.2, como en el caso de los devanados imbricados fraccionarios, pero solamente para el valor de ***Ug = E + ½***, como antes se mencionó.

Debido a los motivos antes expuestos, en lo que sigue describiremos solamente el cálculo y la ejecución de los devanados ondulados enteros.

Proceso de cálculo de los devanados ondulados enteros

El orden y el proceso a seguir, para el cálculo y posterior dibujado del esquema, es similar al estudiado en el capítulo siete de esta obra, para los devanados ondulados de corriente continua, donde se partía del paso resultante ***Y***, deducido del número de secciones inducidas o del número de delgas del colector ***[Y = Y1 + Y2 = (S ± 1) / p = (D ± 1) / p]***; mientras que aquí hemos de deducirlo a partir del número de bobinas ***B*** o del número de ranuras ***K***, de la máquina. Por tanto, el orden a seguir es el siguiente:

1. Primeramente se comprueba la **posibilidad de ejecución**, teniendo en cuenta que para la ejecución de un devanado *ondulado entero* debe cumplirse:

   – ***Posibilidad de ejecución: Ug*** $= \dfrac{B}{2p \cdot q} =$ *Número entero*

   Este mismo cálculo nos determina también el **número de bobinas por grupo Ug,** que ha de tener el devanado, tanto en su parte progresiva como regresiva.

2. A continuación se determinará el valor del **paso resultante *Y*** definido en el capítulo cinco de esta obra y de nuevo en la figura 8.17 , por medio de la fórmula siguiente:

   – ***Paso resultante: Y*** $= Y1 + Y2 = \dfrac{B}{p} = \dfrac{K}{p} =$ *ranuras*

   Recordamos que: B / p es igual a K / p, por ser el devanado ejecutado a dos capas y, por tanto, tener el mismo número de bobinas que de ranuras.

3. Seguidamente se determina el **paso de ranura o ancho de bobina *Yk*** que, en estos casos, es igual al ancho de sección ***Y1***:

   – ***Paso de ranura o ancho de bobina: Yk = Y1*** $= \dfrac{K}{2p} =$ *ranuras*

4. A continuación se calcula el **paso de conexión**, que determinamos siempre *para un devanado sin cruzar*, según se describió en el capítulo cinco, cuyo valor es el siguiente:

   – ***Paso de conexión: Y2*** $= Y - Y1 = Y - Yk =$ *ranuras*

   Para una mejor ejecución, el llamado **paso anormal de conexión** se aumenta o disminuye en una unidad. Este paso es el que se produce entre el final de una vuelta del recorrido y el comienzo de las vueltas siguientes, cuando el devanado tiene más de una bobina por grupo (ver figura 8.17 y 8.19).

5. Seguidamente se determina la **distancia entre principios de fase** y se realiza la tabla de entradas correspondiente, por medio de la misma fórmula empleada para todos los devanados trifásicos descritos en este capítulo:

– ***Distancia entre principios de fases:*** $Yq = \dfrac{K}{3p} = ranuras$

Recordamos una vez más que se puede elegir cualquier ranura de la tabla como principio de cada fase. No obstante, si se trata de un devanado de rotor, conviene elegir como principios ranuras situadas lo más equidistantes posibles, con el fin de mejorar el equilibrio dinámico de la máquina.

6. Por último se dibuja el esquema completo, para lo cual siempre hemos de tener en cuenta que:

   – Conviene numerar solamente los grupos de bobinas superiores, ya que las inferiores son en realidad las conexiones entre los diferentes grupos de bobinas, que para este tipo de devanados, ejecutados por polos, deben unirse el final de cada grupo con el principio del siguiente, al contrario que en los devanados concéntricos e imbricados.

   – Los empalmes de las cabezas de las bobinas se unirán uno de la capa superior con otro de la inferior, por ser devanados a doble capa, lo mismo que luego ocurrirá con las secciones de las bobinas o con las pletinas al ser ejecutado el devanado.

   – Los puentes de retorno, por el contrario, unirán siempre las bobinas o pletinas de una misma capa.

   – Diferenciar las tres fases del devanado, bien sea, con colores o trazos diferentes.

A continuación veremos dos ejemplos de cálculo y dibujado del esquema de dos devanados ondulados, diferentes, según sus características eléctricas y de diseño.

Ejemplo 8.14. Calcular y dibujar el esquema de un devanado ondulado, para el rotor de un motor asíncrono trifásico, decapolar, con armadura de 30 ranuras, ejecutando *por polos* y a doble capa, comenzando el dibujo y la ejecución por la parte progresiva del devanado.

Al ser el devanado de dos capas, el número de bobinas será el mismo que el de ranuras: ***B = K = 30 bobinas.***

Empezaremos por verificar su posibilidad de ejecución, como *devanado ondulado entero*, que como ya se describió será el resultado de obtener como número de bobinas por grupo ***Ug*** un *número entero*. Por ser el devanado a doble capa, la fórmula requerida será:

– ***Posibilidad de ejecución y número de bobinas por grupo:***

$$Ug = \frac{B}{2p \cdot q} = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{30}{10 \times 3} = 1 \text{ bobina}$$

Como el resultado es un número entero, el devanado será perfectamente ejecutable, teniendo éste grupos de una sola bobina.

Seguidamente se determinará el paso de bobina resultante ***Y***, en función del número de bobinas o de ranuras del devanado.

– ***Paso resultante:*** $Y = \frac{K}{p} = \frac{30}{5} = 6 \text{ ranuras}$

Determinamos ahora el paso de ranura o ancho de bobina ***Yk*** que ha de ser igual al ancho de sección *Y1* y al paso polar de la máquina:

– ***Paso de ranura o ancho de bobina:*** $Yk = Y1 = \frac{K}{2p} = \frac{30}{10} = 3 \text{ ranuras}$

A continuación determinamos el paso de conexión ***Y2***, en función de los ya calculados; paso resultante y paso de ranura:

– ***Paso de conexión:*** $Y2 = Y - Yk = 6 - 3 = 3 \text{ ranuras}$

Por último, calcularemos la distancia entre principios de fase y realizaremos la tabla de entradas correspondiente:

– ***Distancia entre principios de fases:*** $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{30}{3 \times 5} = 2 \text{ ranuras}$

Fase U	Fase V	Fase W
1	3	5
7	**9**	11
13	15	17
19	21	**23**

Con todos estos datos ya se puede dibujar el esquema, que es el correspondiente a la figura 8.18, empleando los valores de pasos obtenidos, sin acortar nada, y para el que se han tomado, arbitrariamente, como principios de fase las ranuras: 1, 9 y 23.

Ejemplo 8.15. Calcular y dibujar el esquema de un devanado ondulado, para el rotor de un motor asíncrono trifásico, tetrapolar, con armadura de 24 ranuras, ejecutando *por polos* y a doble capa, comenzando por el avance regresivo de las bobinas.

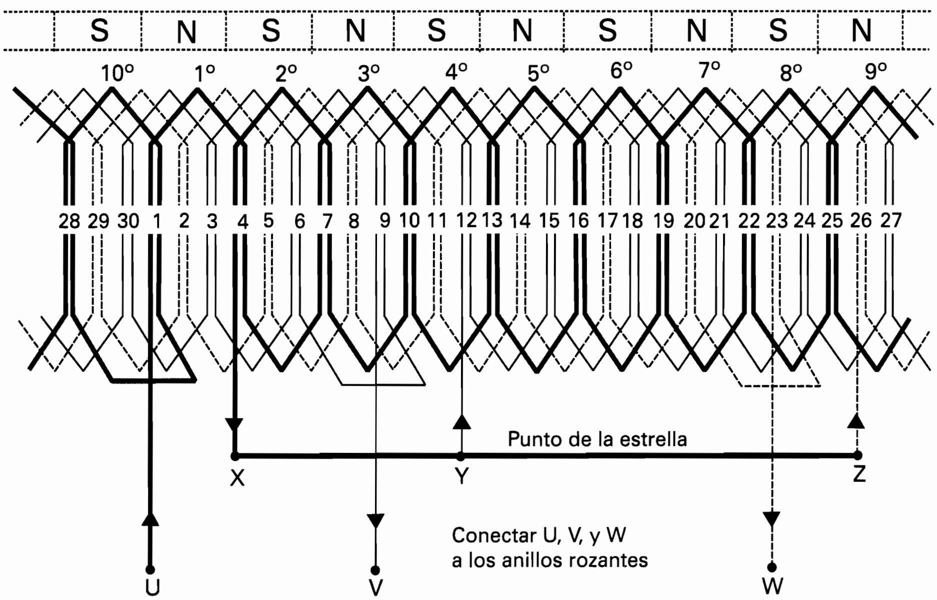


Figura 8.18. Esquema del devanado ondulado entero, trifásico, decapolar, ejecutado por polos y a doble capa, del ejemplo 8.14.

Al ser el devanado de dos capas, el número de bobinas será el mismo que el de ranuras: ***B = K = 24 bobinas.***

Empezaremos por verificar su posibilidad de ejecución, como *devanado ondulado entero*, que como ya se describió será el resultado de obtener como número de bobinas por grupo ***Ug*** un *número entero*. Por ser el devanado a doble capa la fórmula requerida será:

– ***Posibilidad de ejecución y número de bobinas por grupo:***

$$Ug = \frac{B}{2p \cdot q} = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{24}{4 \times 3} = 2 \text{ bobinas}$$

Como el resultado es un número entero, el devanado será perfectamente ejecutable, teniendo éste grupos de dos bobinas.

Seguidamente se determinará el paso de bobina resultante ***Y***, en función del número de bobinas o de ranuras del devanado.

– ***Paso resultante:*** $Y = \frac{K}{p} = \frac{24}{2} = 12 \text{ ranuras}$

A continuación, se determina el paso de ranura o ancho de bobina ***Yk***, que ha de ser igual al ancho de sección *Y1*:

– ***Paso de ranura o ancho de bobina:*** $Yk = Y1 = \frac{K}{2p} = \frac{24}{4} = 6$ *ranuras*

Determinamos a continuación el paso de conexión ***Y2***, en función de los valores ya calculados del paso resultante y del paso de ranura:

– ***Paso de conexión:*** $Y2 = Y - Yk = 12 - 6 = 6$ *ranuras*

Para la perfecta formación de las polaridades correctas, *el paso anormal de conexión* o avance para el comienzo de la segunda vuelta, de cada fase, se realizará con una ranura más en su parte regresiva y con una ranura menos en su parte progresiva.

Por último, calcularemos la distancia entre principios de fase y realizaremos la tabla de entradas correspondiente:

– ***Distancia entre principios de fases:*** $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{24}{3 \times 2} = 4$ *ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	5	**9**
13	**17**	21

Con todos estos datos ya se puede dibujar el esquema, que es el correspondiente a la figura 8.19, y para el que se han tomado como principios de fase las ranuras: 1, 9 y 17.

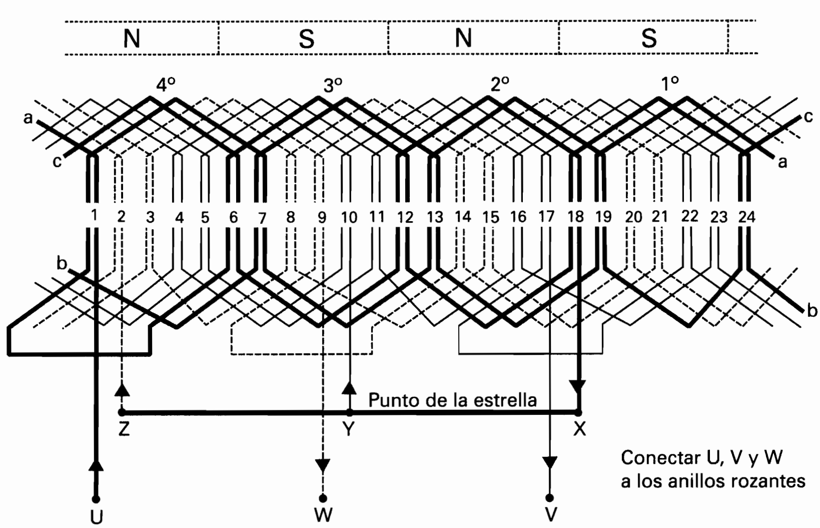


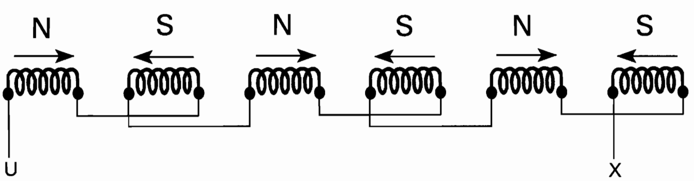
Figura 8.19. Esquema del devanado ondulado entero, trifásico, tetrapolar, ejecutado por polos y a doble capa, del ejemplo 8.15

8.4. DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA CON CIRCUITOS EN PARALELO

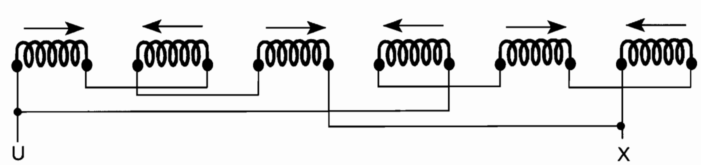
En todos los tipos de devanados de corriente alterna, descritos anteriormente, todas las bobinas y grupos de bobinas de una misma fase se conectaban en una única serie, para formar las polaridades correspondientes. No obstante, en algunos casos, ya sean máquinas grandes o pequeñas, se hace necesario conectar estos grupos de bobinas de tal forma que, dentro de una misma fase, queden formados dos o más grupos en paralelo, tal como se aprecia en los dibujos de las figura 8.20. La ejecución de los devanados con circuitos en paralelo suele hacerse por alguna de las dos razones siguientes:

- Conseguir que la máquina pueda funcionar, mediante una sencilla transformación de la conexión de sus circuitos en serie a paralelo, con dos o más tensiones de red si es un motor, o bien generando dos tensiones distintas si es un generador.

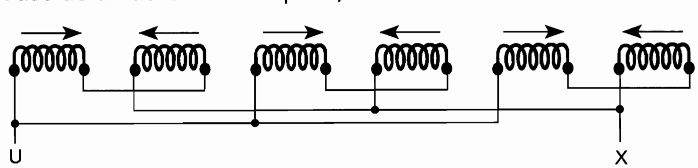
- Algunas veces también es necesario, para ajustar más fácilmente la tensión o fuerza electromotriz deseada, ya que ésta siempre ha de ser proporcional al número de espiras en serie por fase.



Fase de un devanado exapolar, conectada totalmente en serie



Fase de un devanado exapolar, conectada con dos circuitos en paralelo



Fase de un devanado exapolar, conectada con tres circuitos en paralelo

Figura 8.20. Definición de devanados con circuitos en paralelo.

Cuando se diseña o ejecuta el devanado de una máquina, provista de varios circuitos en paralelo, hay que asegurarse de que sus polaridades queden correctamente establecidas, de igual forma que si solamente tuvieran un circuito en serie por fase, ya sea éste ejecutado *por polos* o *por polos consecuentes*. También es muy importante que al deshacer el devanado de una de estas máquinas, se observe y anote con atención si éste tiene sus fases formadas por varias ramas en paralelo.

Posibilidad de ejecución de devanados en paralelo

Para poder ejecutar correctamente un devanado con circuitos en paralelo, es muy necesario que en todos sus circuitos sean exactamente iguales: tanto su fuerza electromotriz o tensión como su impedancia; para lo cual deben cumplirse las dos condiciones siguientes:

a. Todos sus circuitos deben tener el mismo número de bobinas y éstas el mismo número de espiras.

b. Las corrientes que circulan por los diferentes circuitos en paralelo deben tener las direcciones apropiadas, para conseguir el número de polos deseado, ya sea el devanado ejecutado *por polos* o *por polos consecuentes*.

Para que se cumpla correctamente la primera condición es muy importante, al realizar las bobinas, que todas tengan el mismo número de espiras, sin excepción alguna, y además deben ejecutarse todas sobre un mismo molde, para que la longitud de su conductor no varíe entre ellas. De no ser así, al tener los diferentes grupos en paralelo impedancias distintas, podrían establecerse corrientes de circunvalación internas, entre las diferentes ramas en paralelo, que podrían llegar a ser muy perjudiciales para el buen funcionamiento de la máquina.

Número de circuitos en paralelo

El número de circuitos en paralelo, que puede tener un devanado, no es arbitrario, sino que depende del tipo de ejecución (*por polos* o *por polos consecuentes*) y del número de polos de la máquina, según vemos a continuación:

- En los **devanados enteros**, ejecutados ***por polos***, se podrán obtener tantos circuitos en paralelo, como divisores enteros tenga el número de polos (***2p***) de la máquina. Sea por ejemplo el devanado de la figura 8.20, que tiene ***2p = 6***; en el que podrán realizarse devanados con: 1, 2, 3 y 6 circuitos en paralelo.

  Por el contrario, si los devanados ejecutados ***por polos*** son **fraccionarios**, solamente podrán realizarse con tantos circuitos en paralelo, como divisores

enteros tenga su número de grupos de repetición ***GR*** (como ya vimos anteriormente: $GR = 2p / d$); ya que, como es lógico, cada rama en paralelo ha de tener el mismo número de bobinas. Por ejemplo el devanado, tetrapolar, de la figura 8.12, podría ejecutarse, además de en serie, con dos circuitos en paralelo, por ser $GR = 4 / 2 = 2$, mientras que el octapolar de la figura 8.13, solamente puede ejecutarse en serie, por ser $GR = 8 / 8 = 1$.

- En todos los devanados ejecutados ***por polos consecuentes***, se pueden obtener tantos grupos en paralelo, como divisores enteros tenga el número de pares de polos (***p***) de la máquina. Sea, de nuevo, el ejemplo del devanado de la figura 8.20, con $p = 3$; en el que solamente podrán ejecutarse devanados con: 1 y 3 circuitos en paralelo, de ser su ejecución por polos consecuentes.

Proceso de cálculo de devanados de corriente alterna, con varios circuitos en paralelo.

El cálculo, dibujado del esquema y posterior ejecución de un devanado con circuitos en paralelo, es igual al expuesto para los diferentes tipos de devanados de corriente alterna, anteriormente descritos, en los que todos los grupos de bobinas de una misma fase se conectaban en serie. Solamente variará la forma de realizar las conexiones, entre los distintos grupos de una misma fase, para que queden correctamente formados todos los polos de la máquina, de forma idéntica a la que tendrían con todos los grupos de una misma fase conectados en serie, tal como queda perfectamente indicado en la figura 8.20.

A continuación vemos dos ejemplos de devanados con circuitos en paralelo, uno imbricado entero, ejecutado por polos consecuentes y otro imbricado fraccionario, ejecutado por polos. Los cálculos se realizarán sin apenas explicación previa, ya que son igual que para los devanados conectados en serie y éstos han sido ampliamente descritos en este mismo capítulo.

Ejemplo 8.16. Calcular y dibujar el esquema de un devanado imbricado entero, para un motor asíncrono, trifásico, exapolar, con armadura de 36 ranuras, ejecutado por polos consecuentes, a una capa y *con tres circuitos en paralelo.*

– ***Número de bobinas:*** $B = \frac{K}{2} = \frac{36}{2} = 18$ *bobinas (por ser el devanado a una capa)*

– ***Ancho de bobina:*** $Yk = \frac{K}{2p} = \frac{36}{6} = 6$ *ranuras*

– ***Número de bobinas por grupo:***

$$Ug = \frac{B}{p \cdot q} = \frac{18}{3 \times 3} = 2 \text{ bobinas (por ser de polos consecuentes)}$$

– ***Distancia entre principios de fases:*** $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{36}{9} = 4$ *ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	**5**	**9**
13	17	21
25	29	33

Seguidamente se dibuja el esquema, que vemos representado en la figura 8.21, para el que se han tomado como principios de fase las ranuras: 1, 5 y 9.

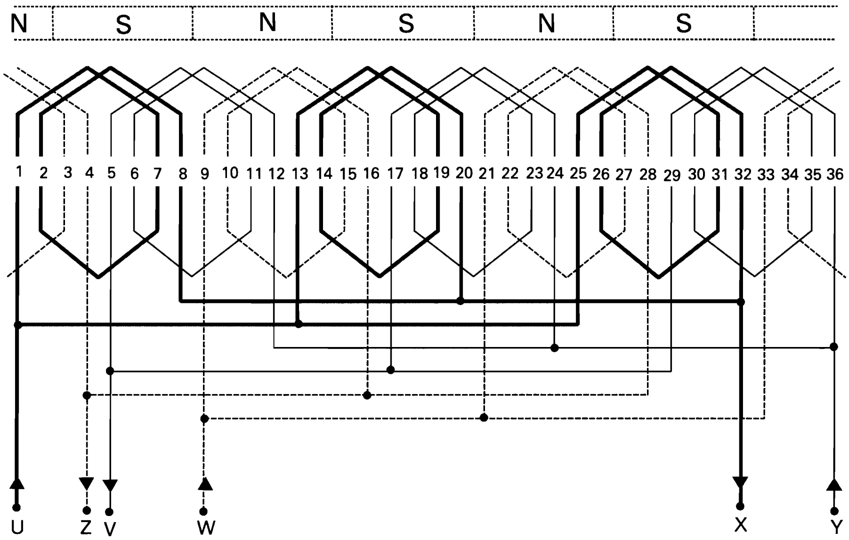


Figura 8.21. Esquema del devanado imbricado entero, trifásico, exapolar, ejecutado por polos consecuentes y a una capa, con tres circuitos en paralelo, del ejemplo 8.16.

Ejemplo 8.17. Calcular y dibujar el esquema de un devanado imbricado fraccionario, para un motor asíncrono, trifásico, octapolar, con armadura de 36 ranuras, ejecutado por polos, a dos capas y *con dos circuitos en paralelo.*

– ***Número de bobinas:*** $B = K = 36$ *bobinas (por ser el devanado a doble capa)*

– ***Ancho de bobina: Yk*** $= \dfrac{K}{2p} = \dfrac{36}{8}$ *= 4,5 ranuras. Lo acortaremos a* ***Yk = 4*** *ranuras*

- ***Número de bobinas por grupo:***

$$Ug = \frac{B}{2p \cdot q} = \frac{36}{8 \times 3} = 1{,}5 = E + \frac{D}{d} = 1 + \frac{1}{2} = \text{bobinas}$$

Analizando este resultado tendremos: grupos de **1** y **2** bobinas (*E* y *E + 1*), y cada grupo de repetición estará formado por un grupo grande de dos bobinas y otro pequeño de una sola bobina. El número de grupos de repetición será de:

– ***Numero de grupos de repetición: GR*** $= \dfrac{2p}{d} = \dfrac{8}{2}$ *= 4 grupos de repetición*

Con los datos obtenidos ya se pueden formar los grupos de repetición, con la ayuda de la tabla 8.2:

E+1 - E - E+1 ; E - E+1 - E = AA - B - CC - A - BB - C (cuatro grupos iguales)

– ***Distancia entre principios de fases: Yq*** $= \dfrac{K}{3p} = \dfrac{36}{12}$ *= 3 ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	**4**	**7**
10	13	16
19	22	25
28	31	34

Seguidamente se dibuja el esquema, que vemos representado en la figura 8.22, para el que se han tomado como principios de fase las ranuras: 1, 4 y 7.

8.5. CONEXIÓN DE DEVANADOS, CON CIRCUITOS EN PARALELO, PARA CAMBIO DE TENSIÓN DE UN MOTOR

Aunque no son muy utilizados, los devanados con varios circuitos en paralelo pueden ser empleados para fabricar motores que funcionen con dos o más tensiones distintas; siempre unas múltiplo de las otras.

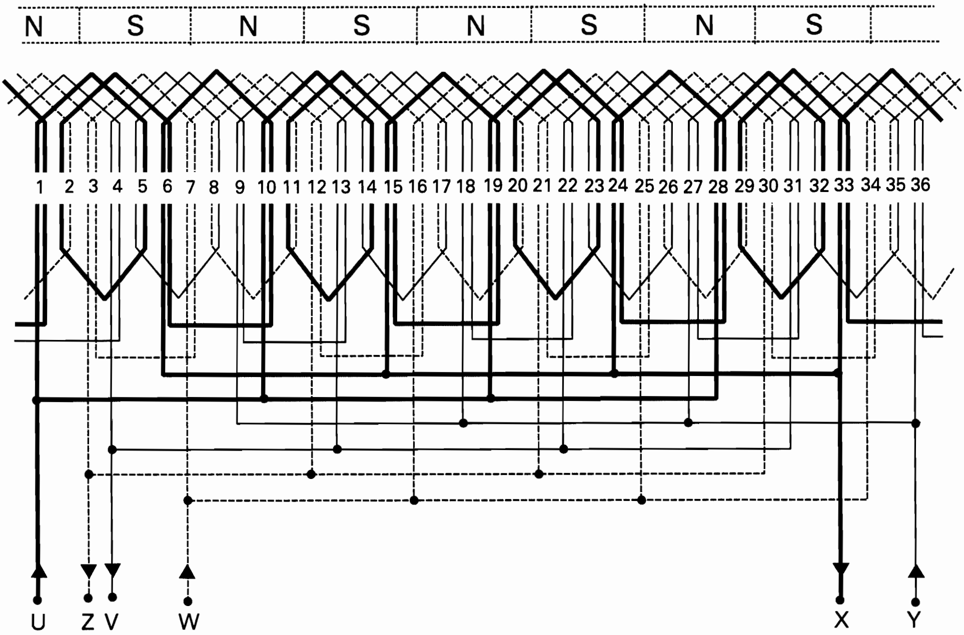
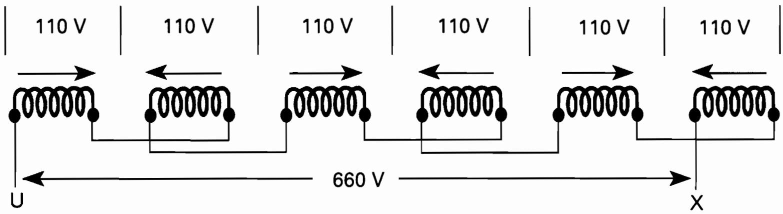


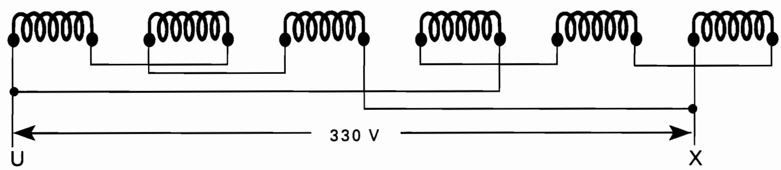
Figura 8.22. Esquema del devanado imbricado fraccionario, trifásico, octapolar, ejecutado por polos y a doble capa, con dos circuitos en paralelo, del ejemplo 8.17

Para ello no hay más que disponer las bobinas o grupos de bobinas de cada fase de forma tal que, bajo las distintas condiciones de alimentación, reciban siempre la misma tensión. Por supuesto, en la práctica, las agrupaciones posibles de bobinas no son más que las que se pueden realizar entre las distintas ramas en paralelo que tiene cada fase del devanado, tal como se aprecia con claridad en los esquemas de la figura 8.23.

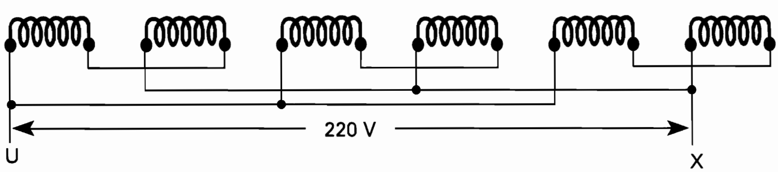
Como esta utilización de los devanados, con circuitos en paralelo, es muy poco utilizada y además la figura 8.23 es suficientemente explicita, no profundizaremos más en este tema. No obstante, si esto fuera necesario, ha de tenerse siempre la precaución de conservar los grupos polares, de cada fase, como unidades completas, sin intentar dividirlos nunca por mitades o por bobinas, para que conserven todos la misma impedancia. Y además, ha de tenerse el sumo cuidado para que, al realizar las conexiones en paralelo, se mantenga la correcta polaridad del motor, en todos los grupos de bobinas y fases.



Ejemplo de alimentación a 660 V. Conectado totalmente en serie



Ejemplo de alimentación a 330 V. Conectado con dos circuitos en paralelo



Ejemplo de alimentación a 220 V. Conectado con tres circuitos en paralelo

Figura 8.23. Posibilidad de los devanados, con circuitos en paralelo, para ser alimentados a varias tensiones.

9

DEVANADOS PARA MOTORES DE DOS VELOCIDADES

9.1. MOTORES ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS DE VARIAS VELOCIDADES

Los motores asíncronos trifásicos pueden construirse para más de una velocidad, bien sea realizándolos con varios devanados, de distinto número de polos, o bien con un solo devanado, pero construido de tal forma que pueda conectarse exteriormente con diferente número de polos. Por tal motivo, a algunos tipos de motores asíncronos trifásicos de varias velocidades se les denomina también *motores de polos conmutables*.

En la figura 9.1 se ven, esquemáticamente, los diferentes tipos de devanados y conexión de los mismos, que más se emplean actualmente en la construcción de motores de varias velocidades, siendo el segundo tipo el más utilizado de todos ellos.

Este tipo de motores, cuyo rotor se construye siempre de jaula de ardilla, se suele emplear por lo general para el accionamiento de máquinas herramientas y de ventiladores, y refiriéndonos a los tipos constructivos de la figura 9.1, sus características principales son las siguientes:

- ***Motores con dos devanados independientes***. Estos motores tienen **dos velocidades** y se construyen de forma tal que cada devanado se ejecuta, interiormente, con un número de polos diferente y, por tanto, según se conecte a la red uno u otro devanado, el motor girará con un número de revoluciones diferente. En este tipo de motores suele conectarse ambos devanados en estrella y las combinaciones de polos más frecuentes son: 6/2, 6/4, 8/2, 8/6, 12/2 y 12/4.
- ***Motores con un solo devanado, en conexión Dahlander***. Estos motores, de **dos velocidades**, se construyen con un devanado trifásico normal, pero

conectado interiormente de forma tal que según se conecten los bornes exteriores a la red, el motor tendrá un número de polos u otro distinto, pero siempre doble el uno del otro. Por tanto, tendrá dos velocidades de rotación, una doble que la otra. Según se aprecia en la figura 9.1, la conexión de sus devanados, se puede realizar en *triángulo o estrella*, para la velocidad menor y en *doble estrella* para la mayor, y las combinaciones de polos más frecuentes son: 4/2, 8/4 y 12/6.

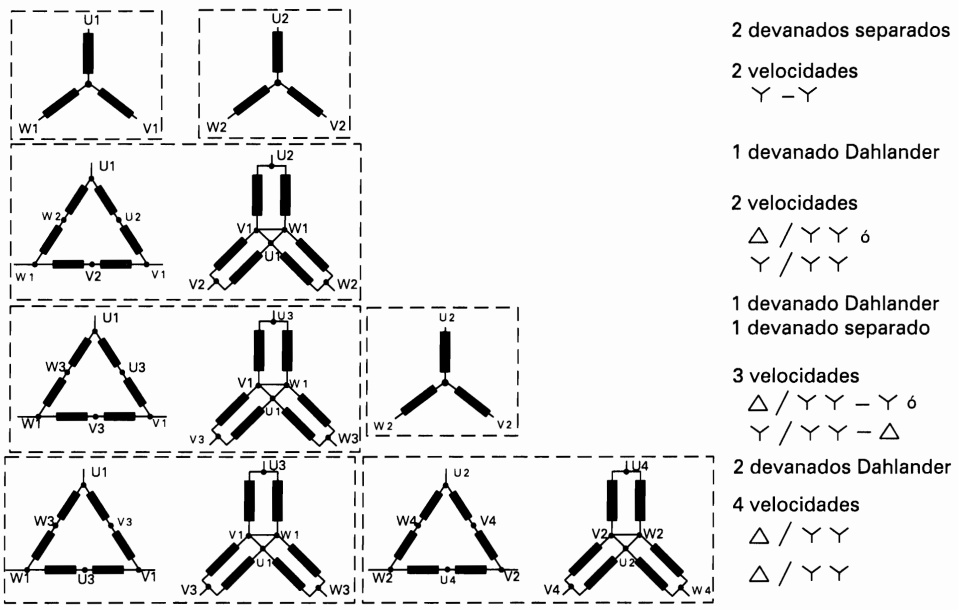


Figura 9.1. Sistemas de conexión de motores asíncronos trifásicos de varias velocidades.

- ***Motores con un devanado Dahlander y otro independiente***. Con este tipo de motores se consiguen **tres velocidades** diferentes: dos con el devanado en conexión Dahlander y la tercera con el devanado independiente, que estará construido con un número de polos distinto a las dos polaridades obtenidas con el primero. Las conexiones más utilizadas son las representadas en la figura 9.1 y las combinaciones de polos más frecuentes son: 6/4/2, 8/4/2, 8/6/4, 12/4/2, 12/6/4, 12/8/4, 16/12/8 y 16/8/4.

- ***Motores con dos devanados Dahlander***. Con este tipo de motores se consiguen **cuatro velocidades**, dos con cada devanado, que han de estar diseñados para polaridades diferentes el uno del otro, siendo las combinaciones de polos más utilizadas: 12/8/6/4 y 12/6/4/2.

9.2 MOTORES DE DOS VELOCIDADES, EN CONEXIÓN *DAHLANDER* O DE POLOS CONMUTABLES

Aunque la solución más sencilla para conseguir motores de varias velocidades, podría parecer la de construir éstos con dos devanados independientes, cada uno de ellos con la polaridad correspondiente a la velocidad deseada, este sistema es muy poco empleado debido a que se necesitan ranuras de gran profundidad para que puedan acoger a los dos devanados, lo cual origina el inconveniente de tener que fabricar estos motores de gran tamaño, que junto con sus dos devanados encarece muchísimo la máquina.

Por tal motivo, el tipo de motor asíncrono trifásico de varias velocidades más utilizado, podríamos decir que casi el único que se emplea actualmente, es el de *un solo devanado en conexión Dahlander* y, por tanto, es el que describiremos con detalle a continuación; tanto en lo referente a su construcción como a sus devanados.

En la figura 9.2, está representado el devanado de un motor asíncrono trifásico en conexión Dahlander, donde se aprecia que solamente tiene un solo devanado, que puede se concéntrico o imbricado, como el de cualquiera de los motores trifásicos descritos en el capítulo anterior. En dicha figura también se pueden apreciar tanto las conexiones internas como las conexiones de la placa de bornes a la red,

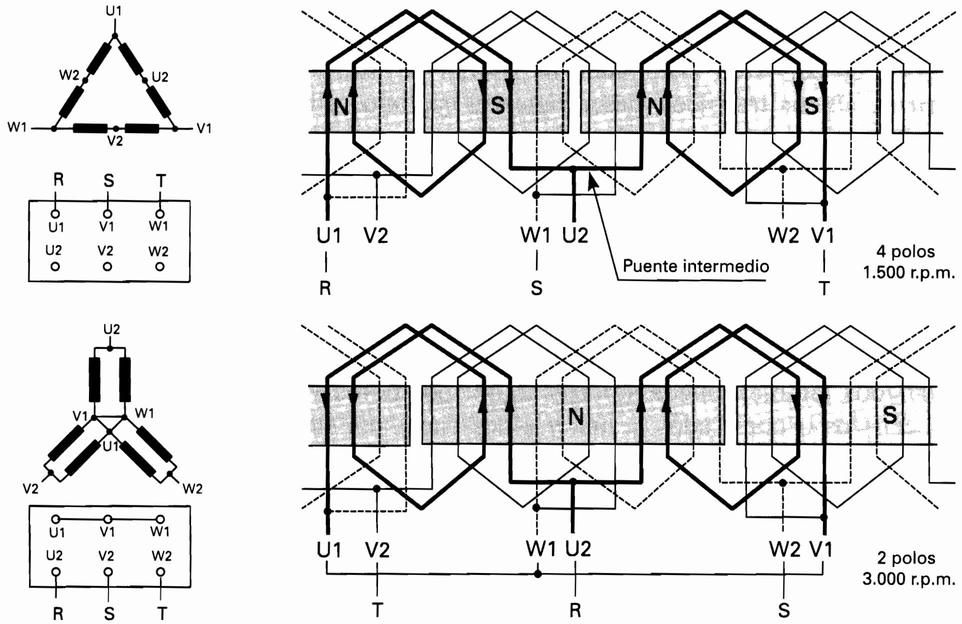


Figura 9.2. Conexiones internas, en triángulo y doble estrella, del devanado de un motor Dahlander, de 2 y 4 polos.

en sus dos posiciones de funcionamiento. Este motor se ha diseñado para trabajar con *cuatro polos*, cuando se conecta en triángulo *y dos polos*, cuando se conecta en doble estrella, estando ejecutado por polos consecuentes y a una capa, según se aprecia en el devanado de la fase ***U1*** resaltada en el dibujo.

En este tipo de devanados, conectados en *triángulo y doble estrella*, como el que se aprecia en la figura 9.2, la conexión triángulo, entre sus tres fases, se realiza en el interior del motor, con el fin de sacar solamente seis bornes a la placa de conexiones, como en cualquier devanado trifásico. Por tanto, para el arranque en la *velocidad menor* (en triángulo), no hay más que aplicar la tensión de la red a los bornes ***U1, V1*** y ***W1*** de la placa de conexiones, con lo cual quedan formados cuatro polos. Por el contrario, para la *velocidad mayor* (en doble estrella), se deben realizar dos operaciones: primeramente hay que cortocircuitar los bornes ***U1, V1*** y ***W1***, para formar exteriormente la estrella y, a continuación, aplicar la tensión de la red a los bornes centrales ***U2, V2*** y ***W2***, en su placa de conexiones, con lo cual se forman dos polos solamente.

9.3. PROCESO DE CÁLCULO DE UN DEVANADO DE DOS VELOCIDADES, EN CONEXIÓN *DAHLANDER*

El cálculo de los devanados de dos velocidades, denominados de polos conmutables o en conexión Dahlander, es similar al utilizado para los devanados de corriente alterna trifásicos, descritos en el capítulo ocho de esta obra, y como el tipo de conexión más utilizada es la de *triángulo - doble estrella*, la única diferencia al realizar éstos es que, *sus tres fases ya se conectan internamente en triángulo*, según se aprecia en la figura 9.2. Conexiones que se sacan a la placa de bornes como entradas de fase y que aquí, en vez de U, V, W, denominamos ***U1, V1*** y ***W1*** mientras que a los otros tres bornes de la placa se saca una conexión, obtenida del centro de cada fase y que denominamos ***U2, V2, W2***, en vez de X, Y, Z.

Al igual que los otros devanados trifásicos de corriente alterna, este tipo de devanados también puede ser ejecutado: por polos y por polos consecuentes, concéntricos o imbricados, a una y a dos capas por ranura. Por tanto, en lo que sigue, se describirá de nuevo el proceso de cálculo, pero de forma resumida, para luego con unos ejemplos numéricos terminar de explicar esto.

Como este tipo de devanados ha de trabajar con dos polaridades distintas, para el cálculo hemos de utilizar también las dos, por tanto llamando: ***(2P*** y ***P***) al número de polos y de pares de polos, de la polaridad mayor, y (***2p*** y ***p***) al número de polos y de pares de polos de la polaridad menor, para el cálculo habremos de utilizar una u otra según los criterios siguientes:

– Se deberá ejecutar con un ***paso de ranura o ancho de bobina***, lo más aproximado a su paso polar, pero siempre con respecto al *número mayor de polos* que este debe tener (***Yk = K / 2P***).

– Por el contrario, ***el número de grupos de bobinas*** se tomará con respecto al *número menor de polos*, tomando siempre: (***Gf = 2p***) y (***G = 2p · q***). Cuando los grupos de bobinas por fase sean más de dos, se distribuirán en dos mitades iguales: una formada por los grupos polares impares y la otra por los grupos polares pares, unidos ambos por el puente intermedio de cada fase. Así quedarán mejor distribuidas sus polaridades, cuando hayan de conectarse las dos mitades en paralelo para la velocidad mayor, pudiendo ser observado este criterio en las figuras 9.2 y 9.4.

– Aunque sobre un mismo devanado se obtienen dos polaridades y éste ha de estar diseñado para ambas, la práctica aconseja tomar la ***distancia entre principios de fase*** con respecto a la *polaridad menor*, separadas unas de otras 120° eléctricos (***Yq = K / 3p***). Por lo cual se realizará el cálculo y la tabla correspondiente, como en cualquier otro devanado trifásico.

Resumiendo, para el cálculo de devanados de polos conmutables o en conexión Dahlander, y de acuerdo con el tipo de devanado, se tomarán las polaridades siguientes:

- **Cálculos a realizar con la polaridad mayor** (***2P*** y ***P***)
  - *Para devanados concéntricos*
    - Número de ranuras por polo y fase (***Kpq***).
    - Número de bobinas por grupo (***Ug***).
  - *Para devanados imbricados*
    - Número de ranuras por polo y fase (**Kpq**).
    - Paso de ranura o ancho de bobina (***Yk***).
- **Cálculos a realizar con la polaridad menor** (***2p*** y ***p***)
  - *Para devanados concéntricos*
    - Número total y por fase de grupos de bobinas (***G*** y ***Gf***).
    - Distancia entre principios de fase (***Yq***).
  - *Para devanados imbricados*
    - Número total y parcial de grupos de bobinas (***G*** y ***Gf***).
    - Número de bobinas por grupo (***Ug***).
    - Distancia entre principios de fase (***Yq***).

A continuación se recuerda de forma resumida, por haber sido extensamente comentados en los capítulos cinco y ocho de esta obra, el proceso de cálculo de estos devanados, tanto concéntricos como imbricados.

Cálculos para devanados concéntricos

Tanto para devanados concéntricos por polos como por polos consecuentes, tendremos un número de ranuras por polo y fase de:

– ***Número de ranuras por polo y fase: Kpq*** $= \dfrac{K}{2P \cdot q} =$ *ranuras*

– ***Número de grupos de bobinas:*** $\begin{cases} Gf = 2p;\ G = 2p \cdot q & \text{(por polos)} \\ Gf = p;\ G = p \cdot q & \text{(por polos consecuentes)} \end{cases}$

– ***Número de bobinas por grupo: Ug*** $= \begin{cases} K/4P \cdot q & \text{(por polos. 1 capa)} \\ K/2P \cdot q & \text{(por polos. 2 capas)} \\ K/2P \cdot q & \text{(por polos consecuentes. 1 capa)} \\ K/P \cdot q & \text{(por polos consecuentes. 2 capas)} \end{cases}$

– ***Amplitud de grupo:*** $\begin{cases} m = (q\text{-}1)\ 2Ug & \text{(devanados por polos)} \\ m = (q\text{-}1)\ Ug & \text{(devanados por polos consecuentes)} \end{cases}$

– ***Paso de principios de fase: Yq*** $= \dfrac{K}{3p} =$ *ranuras*

Cálculos para devanados imbricados

Como ya se mencionó en el capítulo ocho, los devanados imbricados se ejecutan generalmente *por polos*, bien sea a una o dos capas por ranura, con lo cual tendremos:

– ***Número de ranuras por polo y fase: Kpq*** $= \dfrac{K}{2P \cdot q} =$ *ranuras*

– ***Número de grupos de bobinas:*** $Gf = 2p;\ G = 2p \cdot q$ (devanados por polos)

– ***Número de bobinas por grupo: Ug*** $= \begin{cases} B/G = K/4p \cdot q & \text{(por polos. 1 capa)} \\ B/G = K/2p \cdot q & \text{(por polos. 2 capas)} \end{cases}$

– ***Paso de ranura o ancho de bobina: Yk*** $= \dfrac{K}{2P} =$ *ranuras*

– ***Paso de principios de fase: Yq*** $= \dfrac{K}{3p} =$ *ranuras*

Seguidamente se verán dos ejemplos de cálculo y dibujado del esquema, para devanados de dos velocidades, en conexión Dahlander, uno concéntrico y otro imbricado, como compendio final de este capítulo.

Ejemplo 9.1. Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado concéntrico trifásico, para dos velocidades, en conexión Dahlander, de dos y cuatro polos, para un motor de 24 ranuras, ejecutado *por polos consecuentes* y a una capa.

Por ser el devanado a una capa, su número de bobinas será la mitad del número de ranuras: $\boldsymbol{B = K / 2 = 12}$ bobinas.

Primeramente calcularemos el número de ranuras por polo y fase $\boldsymbol{Kpq}$ (con la mayor de sus polaridades, $2P = 4$),a la vez que comprobamos que es posible su ejecución entera ya que, al ser un devanado *por polos consecuentes,* se cumple que el resultado es un número *entero y par*.

Número de ranuras por polo y fase: Kpq $= \dfrac{K}{2P \cdot q} = \dfrac{24}{4 \times 3} = 2$ *ranuras*
(número entero)

Calculamos a continuación el número total de grupos de bobinas (con la menor de sus polaridades, $2p = 2$):

Número de grupos de bobinas: G $= 2p \cdot q = 2 \times 3 = 6$ *grupos de bobinas*

Seguidamente calculamos el número de bobinas que tiene cada grupo (con la mayor de sus polaridades, $2P = 4$), que al ser el devanado por polos consecuentes y a una capa lo obtendremos de la fórmula siguiente:

Número de bobinas por grupo:

$$Ug = \frac{B}{G} = \frac{K}{2P \cdot q} = \frac{24}{4 \times 3} = 2 \text{ bobinas por grupo}$$

Calculamos ahora la amplitud de grupo, para determinar el ancho de cada bobina, que al ser para un devanado por polos consecuentes, obtendremos de la fórmula siguiente:

Amplitud de grupo: m $= (q - 1)\ Ug = (3 - 1)\ 2 = 4$ *ranuras libres*

Por último, determinamos la distancia entre principios de fases (con la menor de sus polaridades, $2p = 2$) y elaboramos la tabla correspondiente:

Distancia entre principios de fases: Yq $= \dfrac{K}{3p} = \dfrac{24}{3 \times 1} = 8$ *ranuras*

Fase U	Fase V	Fase W
1	9	17

Para dibujar el esquema correspondiente (figura 9.3) tomaremos como entradas de fases las ranuras: 1, 9 y 17.

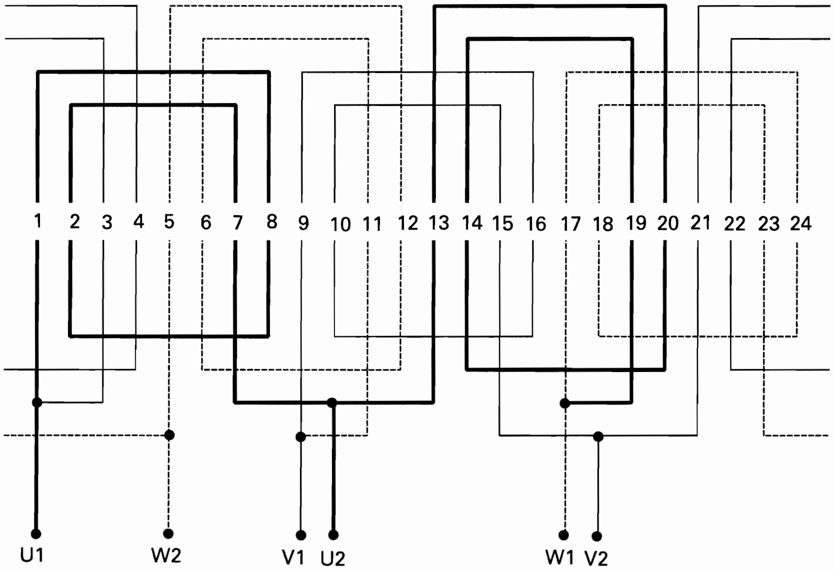


Figura 9.3. Esquema del devanado concéntrico, trifásico, de dos velocidades (2 y 4 polos), en conexión Dahlander, ejecutado por polos consecuentes y a una capa, del ejemplo 9.1.

Ejemplo 9.2. Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado imbricado trifásico, para dos velocidades, en conexión Dahlander, de cuatro y ocho polos, para un motor de 24 ranuras, ejecutado *por polos* y a doble capa.

Al ser un devanado a dos capas, su número de bobinas sera igual al de ranuras: $\boldsymbol{B = K = 24}$ bobinas.

Primeramente calcularemos el número de ranuras por polo y fase ***Kpq*** (con la mayor de sus polaridades, $2P = 8$):

$$\textit{\textbf{Número de ranuras por polo y fase: Kpq}} = \frac{K}{2P \cdot q} = \frac{24}{8 \times 3} = 1 \textit{ ranura}$$

Calculamos a continuación el número total de grupos de bobinas (con la menor de sus polaridades, $2p = 4$):

Número de grupos de bobinas: G $= 2p \cdot q = 4 \times 3 = 12$ *grupos de bobinas*

Seguidamente calculamos el número de bobinas que tiene cada grupo (con la menor de sus polaridades, $2p = 4$):

Número de bobinas por grupo: Ug $= \dfrac{K}{2p \cdot q} = \dfrac{24}{4 \times 3} = 2$ *bobinas por grupo*

Calculamos ahora el paso de ranura o ancho de bobina (con la mayor de sus polaridades, $2P = 8$):

Paso de ranura o ancho de bobina: Yk $= \dfrac{K}{2P} = \dfrac{24}{8} = 3$ *ranuras*

Por último, determinamos la distancia entre principios de fases (con la menor de sus polaridades, $2p = 4$) y elaboramos la tabla correspondiente:

Distancia entre principios de fases: Yq $= \dfrac{K}{3p} = \dfrac{24}{3 \times 2} = 4$ *ranuras*

Fase U	**Fase V**	**Fase W**
1	**5**	**9**
13	17	21

Para dibujar el esquema correspondiente (figura 9.4) tomaremos como entradas de fases las ranuras: 1, 5 y 9.

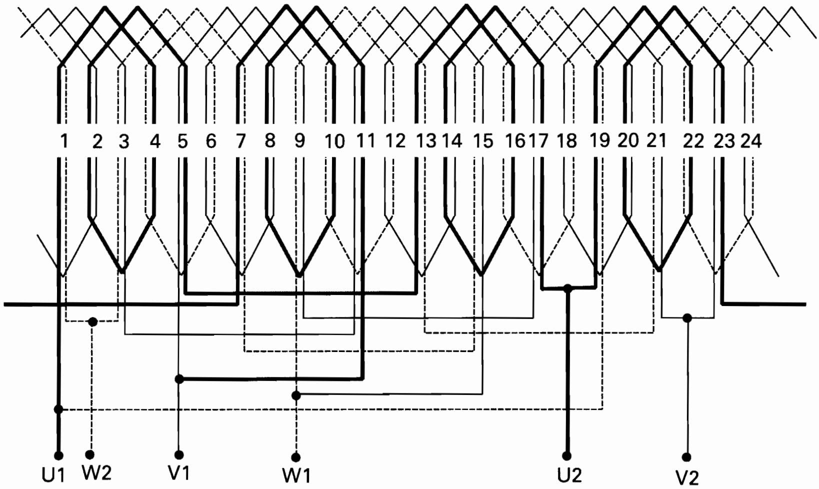


Figura 9.4. Esquema del devanado imbricado, trifásico, de dos velocidades (4 y 8 polos), en conexión Dahlander, ejecutado por polos y a dos capas, del ejemplo 9.2.

10

CÁLCULO Y EJECUCIÓN DE DEVANADOS MONOFÁSICOS DE CORRIENTE ALTERNA

10.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Como ya se describió exhaustivamente en los apartados 3.8 a 3.12, de esta misma obra, existen muchos tipos de motores monofásicos de corriente alterna, siendo los más utilizados los denominados *motores monofásicos con devanado auxiliar de arranque*, también denominados de fase partida. A los motores con este tipo de devanados monofásicos, que pueden ser utilizados tanto con condensadores de arranque como sin condensadores de arranque, es a los que nos referiremos en este capítulo.

Los motores monofásicos con devanado auxiliar de arranque tienen dos devanados independientes, tal como se ve en los dibujos esquemáticos de la figura 10.1, a los cuales denominamos:

- Devanado principal o de trabajo.
- Devanado auxiliar o de arranque.

Los devanados principal y auxiliar, de este tipo de motores, pueden estar separados el uno del otro, ocupando ranuras distintas, o bien superpuestos, aunque siempre han de estar desfasados entre sí 90° eléctricos, en cuanto a su colocación en las ranuras de la armadura se refiere, tal como se aprecia en el dibujo de la figura 10.1 y en los esquemas de los ejemplos posteriores.

Según sea la colocación de ambos devanados, tendremos dos tipos de devanados monofásicos, denominados: *separados* o *superpuestos*. En los *devanados separados*, primeramente se coloca el devanado principal o de trabajo, y en ranuras distintas se coloca el devanado auxiliar o de arranque, por encima del primero, tal como se aprecia en la figura 10.1. Por el contrario, en los *devanados superpuestos*, las bobinas del devanado auxiliar de arranque se colocan en ranuras ocupadas parcialmente por otras del devanado principal de trabajo.

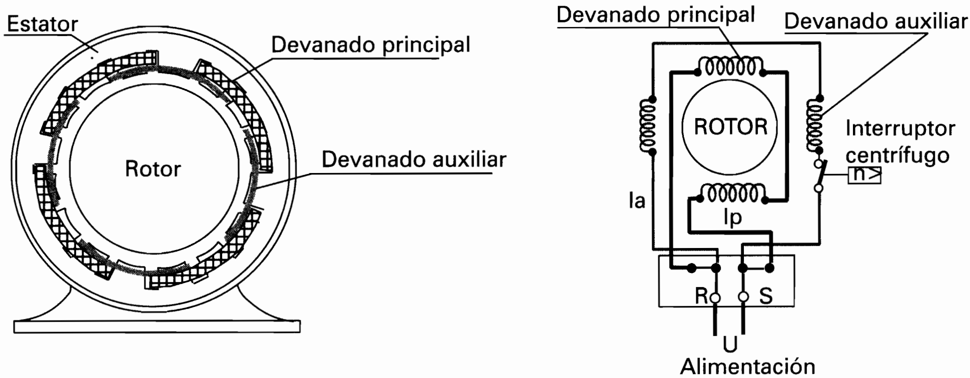


Figura 10.1. Disposición de los devanados y dibujo esquemático de un motor monofásico, con devanado auxiliar de arranque.

Estos dos posibles sistemas de colocación de los devanados traen como consecuencia pequeñas diferencias en el diseño de este tipo de devanados, que hay que tener muy en cuenta, tanto para el cálculo, como para el dibujado del esquema y posterior ejecución del devanado completo.

También hemos de decir que, aunque este tipo de devanados monofásicos podrían ser ejecutados como cualquier otro de corriente alterna –por polos y por polos consecuentes, concéntricos e imbricados–, por lo general se ejecutan: *por polos, concéntricos y a una capa*; aunque los devanados con bobinas superpuestas suelen ser ejecutados también de forma mixta a dos capas por ranura. Con esta forma de ejecución se obtienen las ventajas siguientes:

- Construcción y cálculo más sencillo.
- Permiten que los devanados principal y auxiliar tengan diferente número de espiras y diferente sección de hilo, aunque con los valores de impedancia convenientes al trabajo de cada uno.
- Se consigue un reparto de las cabezas de las bobinas más regular y uniforme, a lo largo de la armadura.

10.2. CÁLCULO Y EJECUCIÓN DE DEVANADOS MONOFÁSICOS, DE FASE PARTIDA

Antes de detallar el proceso de cálculo de estos dos tipos de devanados monofásicos con bobinas separadas y con bobinas superpuestas , recordaremos la nomenclatura empleada para sus características principales, ya definidas en el capítulo 5 de esta obra. Al tener dos devanados cada motor, son éstas:

– Amplitud de grupo, del devanado principal o de trabajo : ***mp***
– Amplitud de grupo, del devanado auxiliar o de arranque: ***ma***
– Número de bobinas por grupo, del devanado principal o de trabajo: ***Up***
– Número de bobinas por grupo, del devanado auxiliar o de arranque: ***Ua***
– Paso de principios de fase: $Yq = Y_{90}$
– Paso de ciclo: Y_{360}

Recordamos también que, tanto en los devanados monofásicos con bobinas separadas como con bobinas superpuestas, los principios de fase de sus dos devanados principal y auxiliar se consideran como si de un solo devanado bifásico se tratara, debiendo estar éstos separados 90º eléctricos (*4p*), en vez de los 120º eléctricos (*3p*) de los devanados trifásicos, por lo cual esta distancia expresada en número de ranuras será:

– Paso de principios de fase, en devanados monofásicos:

$$Yq = Y_{90} = \frac{K}{4p} = ranuras$$

Estos principios de fase hay que ir separándolos luego, unos de otros, 360º eléctricos, mediante el denominado ***paso de ciclo*** (Y_{360}); que expresado en ranuras ha de tener un valor de:

– Paso de ciclo, en devanados monofásicos: $Y_{360} = \frac{K}{p} = ranuras$

Con ambos pasos se realizará la tabla de entradas correspondiente, de forma similar a la representada en la tabla 10.1 y que, como ya se mencionó, es común a ambos devanados (principal y auxiliar) así como a ambas formas de ejecución (con bobinas separadas o con bobinas superpuestas).

TABLA 10.1. Principios de fase y de ciclo en los devanados monofásicos.

<table>
<tr><td rowspan="4">Paso de ciclo $Y_{360°}$</td><td>Devanado principal</td><td>Devanado auxiliar</td></tr>
<tr><td>A</td><td>$B = A + Yq$</td></tr>
<tr><td>$C = A + Y_{360}$</td><td>$D = B + Y_{360}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Paso de principios Yq</td></tr>
</table>

Proceso de cálculo de devanados monofásicos, *con bobinas separadas*

Éste es el tipo de devanado monofásico más empleado y, como ya se mencionó anteriormente, en este tipo de devanados monofásicos, los dos bobinados (princi-

pal y auxiliar) ocupan distintas ranuras de la armadura; ocupando siempre el principal mayor número de ranuras que el auxiliar, por ser el primero de hilo más grueso y tener que trabajar permanentemente, mientras que el auxiliar, que se construye de hilo más fino y menos espiras, por trabajar solamente unos segundos durante el arranque del motor, necesita menos ranuras. Por tanto, atendiendo a estas premisas, para ambos devanados se reserva la proporción de ranuras siguientes:

- Para el devanado principal de trabajo: *dos tercios de ranuras.*
- Para el devanado auxiliar de arranque: *un tercio de ranuras.*

Teniendo en cuenta este reparto y que, por lo general, son devanados ejecutados por polos y a una capa; se hallará primeramente el número de bobinas por grupo del devanado principal (***Up***) que, en este tipo de devanados, con bobinas separadas, coincide con su amplitud de grupo (***mp***); siendo ambos valores:

– ***Número de bobinas por grupo y amplitud de grupo:***

$$Up = mp = \frac{2}{3} \cdot \frac{K}{4p} = \frac{K}{6p}$$

A continuación se calculará el número de bobinas por grupo del devanado auxiliar (***Ua***), así como su amplitud de grupo (***ma***), por medio de las fórmulas siguientes:

– ***Número de bobinas por grupo, del devanado auxiliar:***

$$Ua = \frac{1}{3} \cdot \frac{K}{4p} = \frac{K}{12p}$$

La amplitud de grupo en este caso ha de ser doble que la correspondiente al devanado principal, ya que ha de acoger, en su interior, doble número de bobinas que el devanado principal:

– ***Amplitud de grupo, del devanado auxiliar:*** $ma = 2\,\frac{2}{3} \cdot \frac{K}{4p} = \frac{K}{3p}$

Seguidamente se deben calcular el *paso de principios de fase* ***Yq*** y el *paso de ciclo* Y_{360}, y realizar la tabla correspondiente, como ya se describió, anteriormente, en este mismo capítulo.

Por último se dibuja el esquema, diferenciando el devanado principal del auxiliar y eligiendo como entradas de ambos devanados, las ranuras más convenientes de la tabla.

A continuación veremos un ejemplo concreto, de cálculo y posterior dibujado del esquema, de un devanado monofásico, ejecutado con bobinas separadas:

Ejemplo 10.1. Calcular y dibujar el esquema de un devanado monofásico, con bobinado auxiliar de arranque, para un motor tetrapolar, con 24 ranuras en su armadura, ejecutado *por polos* y *con bobinas separadas*:

Primeramente se calculará el número de bobinas por grupo ***Up*** y la amplitud de dicho grupo ***mp***, del bobinado principal, expresada en ranuras, que como ya sabemos tienen ambos el mismo valor:

– Número de bobinas por grupo y amplitud de grupo:

$$Up = mp = \frac{K}{6p} = \frac{24}{6 \times 2} = 2$$

A continuación se determina el número de bobinas por grupo y la amplitud del mismo, correspondiente al devanado auxiliar ***Ua*** y ***ma***:

– Número de bobinas por grupo, del devanado auxiliar:

$$Ua = \frac{K}{12p} = \frac{24}{12 \times 2} = 1 \text{ bobina}$$

– Amplitud de grupo, del devanado auxiliar: $ma = \frac{K}{3p} = \frac{24}{3 \times 2} = 4$ *ranuras*

Seguidamente, se calculan los pasos de principio ***Yq*** y de ciclo Y_{360} y se elabora la tabla correspondiente, para elegir las ranuras que pueden ser entradas de fase:

– Paso de principios de fase: $Yq = Y_{90} = \frac{K}{4p} = \frac{24}{4 \times 2} = 3$ *ranuras*

– Paso de ciclo: $Y_{360} = \frac{K}{p} = \frac{24}{2} = 12$ *ranuras*

Devanado principal *Up*	**Devanado auxiliar *Ua***
1	4
13	16

Con estos datos ya se puede dibujar el esquema completo del devanado, que es el correspondiente a la figura 10.2, para el que hemos tomado, de la tabla, como entradas de los devanados principal y auxiliar las ranuras 1 y 4, aunque se podían haber tomado también las ranuras: 13 - 16, 1 - 16 ó 4 - 13.

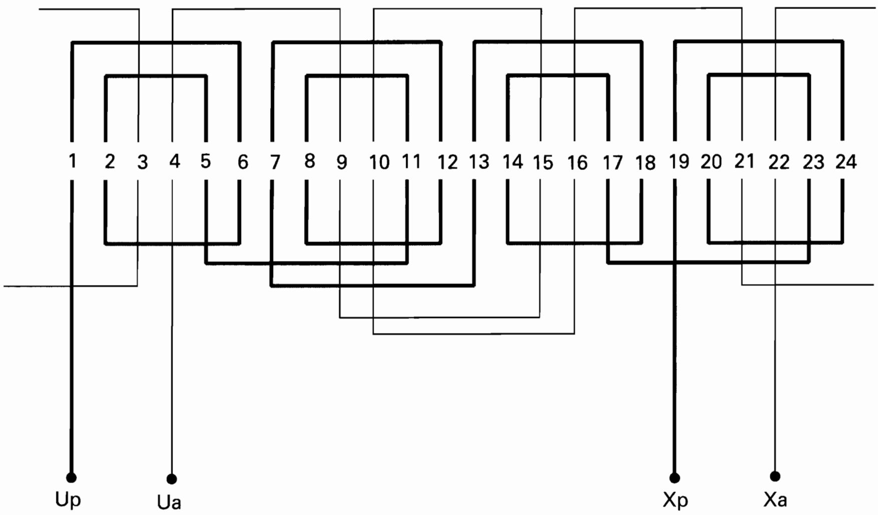


Figura 10.2. Esquema del devanado monofásico, de fase partida, tetrapolar, ejecutado por polos y con bobinados separados, del ejemplo 10.1.

Proceso de cálculo de devanados monofásicos, con bobinas superpuestas

En este tipo de devanados monofásicos, mucho menos utilizados que los de bobinas separadas, el proceso de cálculo puede parecer un poco extraño, ya que se debe partir de adoptar, de forma totalmente arbitraria, el número de bobinas por grupo, tanto de su devanado principal ***Up*** como de su devanado auxiliar ***Ua***, y cuyo valor puede ser tomado como ***entero*** o ***entero mas media unidad***, dependiendo del valor obtenido para la amplitud del devanado principal ***mp***.

Si el valor de (***Ua***) es entero mas media unidad, significa que hemos de hacer la bobina exterior de cada grupo de bobinas con la mitad de espiras, y que cada dos de estas medias bobinas ocupará una misma ranura, al igual que ocurría en los *devanados mixtos*, concéntricos trifásicos, descritos en el capítulo ocho de esta obra.

Una vez adoptados estos valores, se determinará el número de ranuras que ocupará cada devanado principal y las que quedarán libres para el auxiliar, con las fórmulas siguientes:

– *Número de ranuras ocupadas por el devanado principal:* ***2p · 2Up***

– *Número de ranuras libres:* ***K -(2p · 2Up)***

A continuación se determinará la amplitud de grupo del devanado principal (***mp***), partiendo de las ranuras que ha de dejar libre este devanado, ya que son las bobinas del devanado auxiliar las que han de ocupar estas ranuras, por medio de la fórmula siguiente:

– ***Amplitud de grupo del devanado principal: mp*** $= \dfrac{K - (2p \cdot 2Up)}{2p} = ranuras$

Seguidamente se determinará la amplitud de grupo del devanado auxiliar (***ma***), de forma análoga al anterior, pero su valor, que ha de depender de los valores obtenidos para el devanado principal, ha de ser acorde con las siguientes condiciones:

Si: ***mp*** = *número par*, tendremos: ***Ua*** = *número entero*

Si: ***mp*** = *número impar*, tendremos: ***Ua*** = *número entero + media unidad*

– ***Amplitud de grupo del devanado auxiliar: ma*** $= \dfrac{K - (2p \cdot 2Ua)}{2p} = ranuras$

Por último se determinan las entradas de fase, por medio de los: pasos de principios de fase ***Yq*** y de ciclo Y_{360}, y se elabora la tabla correspondiente, de idéntica forma a la utilizada para los devanados monofásicos con bobinas separadas.

A continuación veremos los ejemplos, de cálculo y posterior dibujado del esquema, de dos devanados monofásicos, ejecutados ambos con bobinas superpuestas, aunque con diferente número de bobinas por grupo cada uno, pero resultando ambos como devanados mixtos.

Ejemplo 10.2. Calcular y dibujar el esquema de un devanado monofásico, con bobinado auxiliar de arranque, para un motor tetrapolar, con 24 ranuras en su armadura, ejecutado *por polos* y *con bobinas superpuestas.*

Como ya sabemos, empezaremos por determinar, de forma totalmente convencional, aunque razonada, el número de bobinas por grupo de los devanados principal y auxiliar. Tomamos: ***Up = 2,5*** y ***Ua = 1,5***, con lo cual obtendremos un devanado doblemente mixto.

Con estos valores, determinamos a continuación la amplitud de grupo, del devanado principal (***mp***):

- ***Amplitud de grupo del devanado principal:***

$$mp = \frac{K - (2p \cdot 2Up)}{2p} = \frac{24 - (4x2x2{,}5)}{4} = 1\ ranura$$

Seguidamente, determinamos la amplitud de grupo del devanado auxiliar (***ma***)

- ***Amplitud de grupo del devanado auxiliar:***

$$\boldsymbol{ma} = \frac{K - (2p \cdot 2Ua)}{2p} = \frac{24 - (4x2x1{,}5)}{4} = 3 \ \ ranuras$$

Por último, se calculan los pasos de principio ***Yq*** y de ciclo $\boldsymbol{Y_{360}}$ y se elabora la tabla correspondiente, para determinar las ranuras que pueden ser entradas de fase:

$$\textbf{– Paso de principios de fase: } \boldsymbol{Yq} = Y_{90} = \frac{K}{4p} = \frac{24}{4\,x\,2} = 3 \ ranuras$$

$$\textbf{– Paso de ciclo: } \boldsymbol{Y_{360}} = \frac{K}{p} = \frac{24}{2} = 12 \ ranuras$$

Devanado principal *Up*	**Devanado auxiliar *Ua***
1	4
13	16

Con estos datos ya se puede dibujar el esquema completo del devanado, que es el correspondiente a la figura 10.3, para el que hemos tomado, de la tabla, como entradas de los devanados principal y auxiliar, las ranuras 1 y 4, al igual que en el ejemplo anterior.

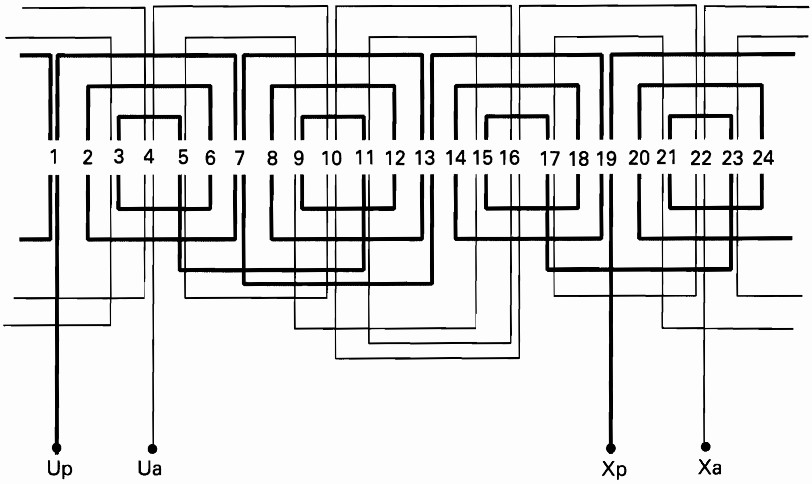


Figura 10.3. Esquema del devanado monofásico, de fase partida, tetrapolar, ejecutado por polos y con bobinados superpuestos, del ejemplo 10.2

Ejemplo 10.3. Calcular de nuevo el devanado del ejemplo anterior, pero con distinta solución, y dibujar el esquema correspondiente. También con 24 ranuras en su armadura, ejecutado *por polos* y *con bobinas superpuestas*.

Aunque se trata del mismo motor del ejemplo anterior (10.2), tomamos en este caso el mismo número de bobinas para ambos devanados: ***Up = 2,5*** y ***Ua = 2,5***, aunque conservando siempre el mismo número de espiras en total, en ambos devanados. También lo hemos diseñado como un devanado doblemente mixto.

Con estos nuevos valores, elegidos arbitrariamente, aunque después de estudiar el número de polos y de ranuras, para la mejor distribución de los grupos de bobinas, determinamos a continuación la amplitud de grupo, del devanado principal (***mp***):

– ***Amplitud de grupo del devanado principal:***

$$\boldsymbol{mp} = \frac{K - (2p \cdot 2Up)}{2p} = \frac{24 - (4x2x2{,}5)}{4} = 1 \ ranura$$

Seguidamente, determinamos la amplitud de grupo, del devanado auxiliar (***ma***) que, en este caso, coincide con la del devanado auxiliar, por tener ambos el mismo número de bobinas por grupo.

– ***Amplitud de grupo del devanado auxiliar:***

$$\boldsymbol{ma} = \frac{K - (2p \cdot 2ap)}{2p} = \frac{24 - (4x2x2{,}5)}{4} = 1 \ ranura$$

Por último, se calculan los pasos de principio ***Yq*** y de ciclo Y_{360} y se elabora la tabla correspondiente, para determinar las ranuras que pueden ser entradas de fase:

– ***Paso de principios de fase:*** $Yq = Y_{90} = \frac{K}{4p} = \frac{24}{4 \times 2} = 3 \ ranuras$

– ***Paso de ciclo:*** $Y_{360} = \frac{K}{p} = \frac{24}{2} = 12 \ ranuras$

Devanado principal *Up*	**Devanado auxiliar *Ua***
1	4
13	16

Con estos datos ya se puede dibujar el esquema completo del devanado, que es el correspondiente a la figura 10.4, para el que hemos tomado como entradas de los devanados principal y auxiliar las ranuras 1 y 4, al igual que en los ejemplos anteriores.

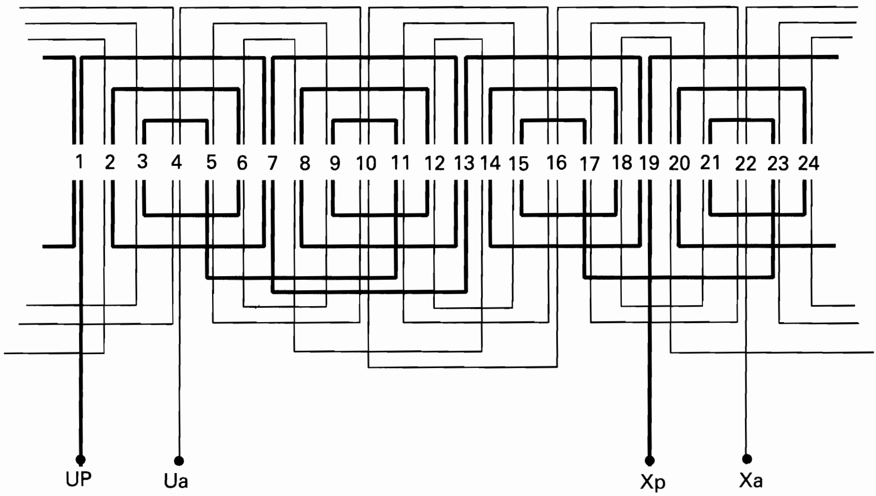


Figura 10.4. Esquema del devanado monofásico, de fase partida, tetrapolar, ejecutado por polos y con bobinados superpuestos, del ejemplo 10.3

11

EJECUCIÓN PRÁCTICA Y BARNIZADO DE MOTORES ELÉCTRICOS

11.1. CONSTRUCCIÓN DE BOBINAS

Las bobinas para la ejecución de los devanados eléctricos pueden construirse de muchas formas y tamaños, dependiendo siempre del tipo de máquina y de la potencia de la misma. Asimismo pueden ser: con el conductor de hilo o de pletina, construidas con los conductores ya aislados o con conductores desnudos y aislados posteriormente, con un solo conductor o con varios en paralelo, construidas manualmente o por medio de máquinas bobinadoras, etc.

Cuando las bobinas son de hilo, para el devanado correcto de las mismas se preparan moldes acanalados, apropiados a su longitud y anchura, de acuerdo con las medidas de la armadura que las ha de contener. Los moldes suelen fabricarse de: madera, metálicos o de materiales plásticos, a su vez pueden ser fijos o extensibles, para una sola bobina o múltiples, tal como se aprecia en los dibujos de la figura 11.1.

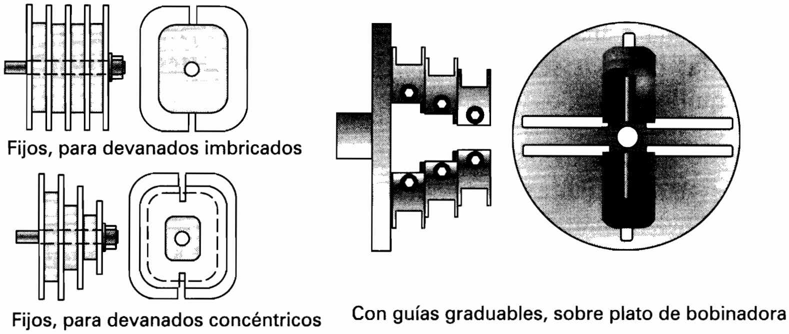


Figura 11.1. Moldes para la construcción de bobinas

Los moldes múltiples, suelen fabricarse con tantos módulos o partes como bobinas por grupo ha de tener el devanado, pudiendo ser estos módulos: todos iguales, si el devanado ha de ser imbricado, o bien de diferentes tamaños, cuando se trata de devanados concéntricos.

Cuando las bobinas son de pletina, por lo general de una sola espira, y para devanados ondulados, no pueden ser ejecutadas como las anteriores, debido a su mala flexibilidad, por lo cual suelen fabricarse o componerse moldes o plantillas apropiados a su perfil y se les va dando forma a las pletinas, bien sea de forma manual o con máquinas plegadoras, unas veces en forma de bobinas completas y otras de medias bobinas, como se aprecia en la figura 11.2.

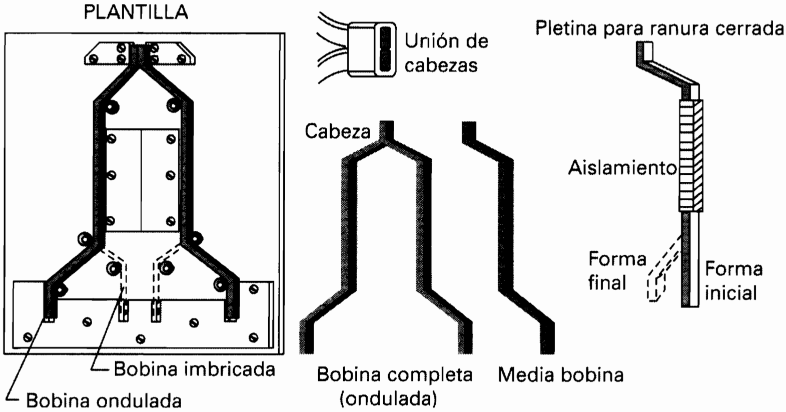


Figura 11.2. Moldes o plantillas para la construcción de bobinas de pletina.

Cuando las bobinas de pletina se emplean en armaduras con ranuras abiertas, pueden moldearse completamente las bobinas o medias bobinas. Por el contrario, cuando las ranuras son cerradas o semicerradas solamente se puede preparar una cabeza de la bobina y una vez aislada e introducida en la ranura, se les da la forma definitiva. Si las bobinas se construyen por mitades, se han de unir ambas, por medio de casquillos soldados, para completar la bobina.

En la mayoría de los casos, cuando los devanados son de pletina, y se trata de rebobinar un devanado que se ha quemado, no es necesario moldear nuevas pletinas, ya que lo que se estropea generalmente es el aislamiento que las recubre, así como el aislamiento de las ranuras. En estos casos no hay más que extraerlas, limpiar y aislar de nuevo, pletinas y ranuras, y volverlas a introducir y conectar debidamente. Si las ranuras son cerradas o semicerradas, se complica el trabajo, ya que hay que enderezar una cabeza de cada bobina, para poder sacarlas, y una vez intro-

ducidas de nuevo, darles la forma que tenían en las cabezas. En estos casos, y para facilitar el trabajo de moldeado de las pletinas, es conveniente recocer el cobre, para aumentar su flexibilidad.

11.2. COLOCACIÓN Y AISLAMIENTO DE LAS BOBINAS

Una vez confeccionadas las bobinas, y sobretodo cuando se construyen de pletina desnuda o con conductores aislados con tejido de algodón, seda o fibra de vidrio, puede ser conveniente terminar su aislamiento. Esta tarea se suele realizar, a mano o a máquina, por medio de cintas de material aislante arrolladas sobre las bobinas, acordes con la clasificación térmica requerida por la máquina, según se aprecia en la figura 11.3. Si fuera necesario, se estrangularán las bobinas, antes del encintado, tal como se describe en el apartado 11.3.

Antes de introducir las bobinas en las ranuras del palastro, hay que limpiar dichas ranuras cuidadosamente sobretodo si es una máquina que hay que rebobinar, aislar las ranuras, con una o varias capas de material aislante, apropiado a la tensión y las características térmicas de funcionamiento de la máquina (ver capítulo 6).

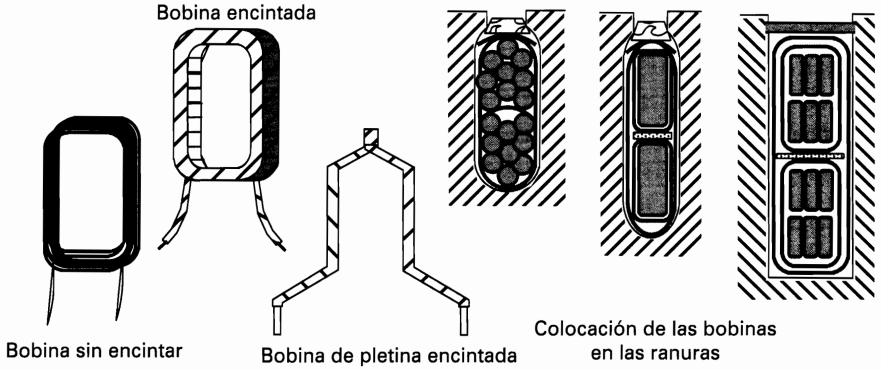


Figura 11.3. Aislamiento de bobinas y su colocación en las ranuras de la armadura.

Seguidamente ya se pueden introducir las bobinas en las ranuras, cuidando de no dañar los aislamientos de conductores y ranuras, distribuyendo sus cabezas de la forma más apropiada posible, acordes con la distribución que ya tenían en el devanado viejo. Si el devanado fuera a doble capa por ranura, se colocará, en cada ranura, una o varias tiras de material aislante entre ambas bobinas. Por último, una vez introducidas todas las bobinas correctamente, se cierra el aislante de las ranuras sobre las bobinas y se colocan las cuñas de cierre de ranura, según se aprecia en las figuras 11.3 y 6.2 de esta obra.

Una vez introducidas todas las bobinas, ya se pueden conectar las bobinas y los grupos de bobinas entre sí, de forma igual a la dibujada en el esquema del devanado, con el fin de obtener las polaridades correctas requeridas por la máquina. Si el devanado es de pletina y está formado por medias bobinas, previamente hay que completarlas, uniendo sus cabezas posteriores, por medio de casquillos, soldados generalmente, tal como se aprecia en la figura 11.2.

Por último, y una vez verificadas y comprobadas las correctas conexiones del devanado, se aislarán convenientemente las cabezas de las bobinas y puentes de conexión, por medio de cintas y tubos aislantes, tejidos y láminas de papel o cartón, acordes con la clasificación térmica del resto de los aislamientos, y se atará éste convenientemente, antes de proceder al barnizado final del devanado.

11.3. ESTRANGULAMIENTO DE BOBINAS

En los devanados con bobinas rígidas e iguales –para armaduras de ranuras abiertas generalmente– como es el caso de los imbricados u ondulados, construidos con pletinas o hilos muy gruesos, la construcción de las bobinas se realiza en dos fases: primeramente se devanan las bobinas sobre moldes o plantillas apropiadas, de tal forma que sus dos lados activos queden en el mismo plano, en vez de quedar paralelos como los de las bobinas fácilmente moldeables. A continuación, se procede a darles forma, abriendo éstas a la distancia requerida por su paso de ranura, quedando ambos lados paralelos entre sí, para su fácil introducción en las ranuras, tal como se aprecia en los dibujos de la figura 11.4.

A esta deformación final de las bobinas es a lo que se denomina *estrangulamiento* y a este tipo de bobinas estranguladas. El estrangulamiento o la deformación de las bobinas puede realizarse sobre el propio bastidor de la máquina de bobinar o bien por medio de un artilugio casero. En ambos casos y por medio de un husillo, se desplazan los dos lados activos de las bobinas, hasta la distancia e inclinación deseada. El aislamiento o encintado final de las bobinas suele realizarse una vez estranguladas, para evitar roturas y desgarrones durante el proceso de estrangulamiento.

Como los devanados pueden ser a una o dos capas por ranura, durante el estrangulamiento deberá tenerse esto presente, para que cuando se introduzcan las bobinas en las ranuras, ambos lados activos queden completamente paralelos (devanados a una capa), o bien paralelos pero desplazados media ranura, cuando el devanado es a doble capa y un lado activo ha de colocarse en el fondo de la ranura y el otro en el exterior, tal como se aprecia en los devanados de rotor y estator de la figura 11.4.

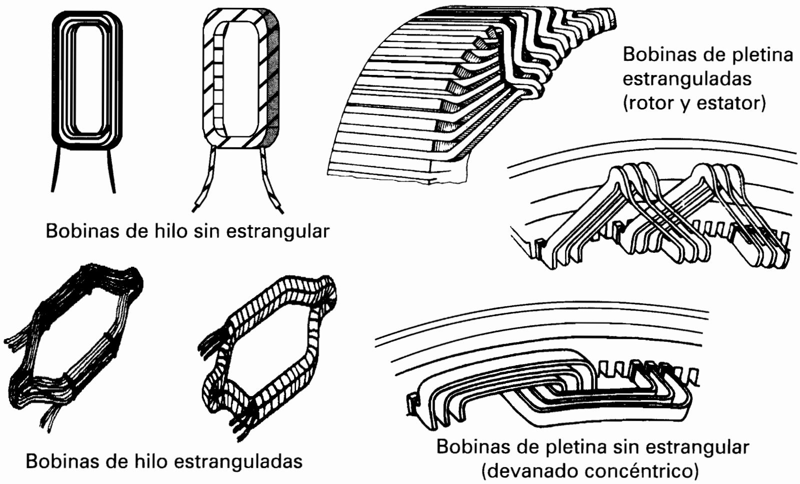


Figura 11.4. Ejecución y colocación de bobinas estranguladas.

11.4. ZUNCHADO DE ROTORES E INDUCIDOS

En los devanados rotóricos y de inducidos, que están expuestos a una gran fuerza centrífuga durante su funcionamiento, podrían llegar a salirse las bobinas de las ranuras o bien abrirse las cabezas de las mismas, si no se toman medidas correctoras que lo eviten. Para ello deben atarse, fuertemente, mediante zunchos, tanto los lados activos como las cabezas de las bobinas, tal como se aprecia en la figura 11.5.

Antiguamente los zunchos se realizaban exclusivamente, con alambres metálicos de gran resistencia (acero, latón, etc.), de 0,5 a 1,5 mm de diámetro generalmente, colocando estos: sobre muescas efectuadas sobre el propio hierro del rotor, para la sujeción de los lados activos de las bobinas y sobre ambos lados de las cabezas de las bobinas, previo aislamiento, por medio de tiras de material aislante, acorde con las características térmicas del motor. Una vez realizados y tensados los zunchos, se sujetaban con pequeñas bridas o tiras de cobre o latón, soldadas al propio zuncho.

Actualmente el atado se realiza, casi exclusivamente, con cintas de fibra de vidrio, impregnadas generalmente de resinas de poliéster, que pueden llegar hasta la clase térmica de aislamiento tipo ***F*** (155°). Los hilos de fibra de vidrio que constituyen la cinta son paralelos entre sí y sin trama alguna, lo que junto con la resina de poliéster que los impregna, una vez ejecutado el zuncho, se polimerizan, por

medio de calor, apretando éste y dando lugar a una sujeción sólida y compacta de gran resistencia mecánica.

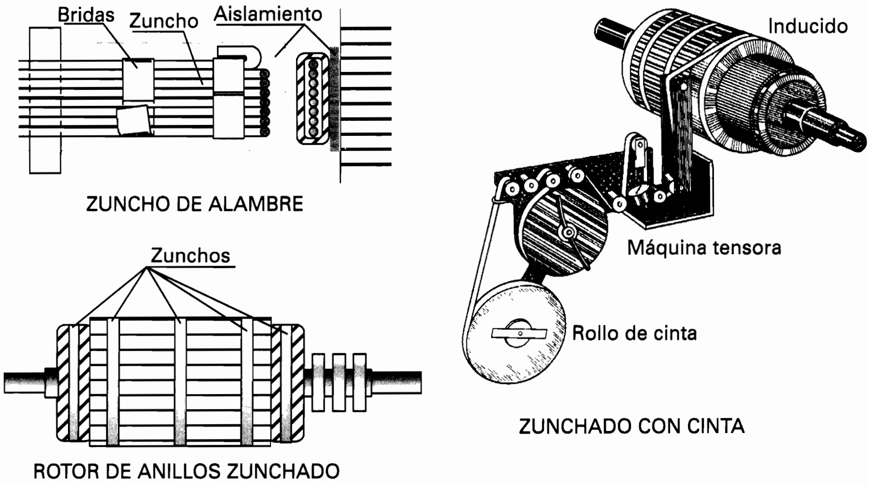


Figura 11.5. Zunchado de rotores e inducidos.

Los zunchos textiles, a base de fibras de vidrio y resinas sintéticas, presentan frente a los zunchos metálicos las siguientes ventajas:

a. Poseen una gran resistencia a la tracción y unas excelentes cualidades aislantes, por lo que no es necesario colocar otros aislantes en la base del zuncho, con el consiguiente ahorro de espacio y tiempo.

b. No son magnéticos, por lo que se eliminan totalmente los calentamientos que, por el efecto de las corrientes inducidas, pudieran aparecer en los zunchos metálicos.

c. Al polimerizar la resina, una vez calentados los devanados, entre 115° y 150° generalmente, se produce una contracción que mejora el apretado del zuncho.

d. No se corroen, por lo cual son apropiados para máquinas que trabajen en atmósferas cargadas de humedad.

e. Debido a que no necesitan bridas de cierre o sujeción soldadas, como ocurre con los zunchos de alambre, resultan: más baratos, son más fáciles de colocar y se ahorra mucho tiempo.

11.5. BARNIZADO DE DEVANADOS ELÉCTRICOS

Los devanados de las máquinas eléctricas, una vez ejecutados, se recubren con barnices o resinas aislantes, que mejoran sus condiciones dieléctricas y mecánicas. Como ya se describió en el capítulo seis de esta obra, existen muchos tipos de barnices y resinas aislantes para poder ser utilizados en todo tipo de máquinas eléctricas, en función de las condiciones térmicas que estas hayan de soportar. Actualmente casi todos los tipos de resinas y barnices son de tipo sintético y de secado al horno, fabricándose barnices desde la clase térmica ***B*** (130º) a la clase térmica ***F*** (155º) y resinas hasta la clase térmica ***C*** (>180º).

Según sea el tamaño y el tipo de trabajo de la máquina, así como los medios disponibles en el taller, las tareas de: impregnación, relleno y acabado de los devanados eléctricos por medio de barnices o resinas, pueden ser realizadas con los medios y las formas siguientes, representadas en la figura 11.6:

- ***Barnizado con pincel o vertido.*** Este sistema de barnizado solamente se aplica en las reparaciones "in situ" o para máquinas de muy poca potencia devanadas artesanalmente, siendo su eficacia muy pequeña, debido a la poca penetración del barniz. En estos casos, el barniz se aplica por medio de una brocha o pincel, también se puede verter sobre el devanado o aplicar a pistola una vez diluido. Debe aplicarse el barniz con exceso, para conseguir una mayor penetración en las bobinas y materiales aislantes, empleándose muchas veces barnices de secado al aire, debido a su más fácil utilización. Si el barniz no es de secado al aire, el secado posterior ha de hacerse siguiendo las recomendaciones del fabricante del barniz.

- ***Barnizado por inmersión.*** En este procedimiento de barnizado los bobinados, previamente secados (a temperaturas entre 110º y 120º) y aun calientes (entre 35º y 80º generalmente), de acuerdo con las instrucciones del fabricante del barniz o resina, se sumergen enteramente en el barniz, en cubas apropiadas, girándolos y moviéndolos en todos los sentidos para que escapen todas las burbujas de aire ocluidas. Cuando las máquinas son muy grandes, se realiza el barnizado por inmersiones parciales, dando siempre tiempo a que el aire ocluido salga completamente.

  Cuando se ha conseguido la impregnación total del devanado, se retira éste y se deja escurrir, antes de ser introducido en la estufa u horno de secado; donde debe ser secado y curado según los tiempos y las temperaturas recomendadas por el fabricante del barniz, que pueden oscilar de 110º a 160º y entre 30 minutos y 48 horas.

- ***Barnizado al vacío y a presión.*** Este procedimiento de barnizado se utiliza cada vez más, tanto en las fabricas de máquinas eléctricas como en los talle-

res de bobinados de gran solvencia y calidad de servicio, ya que con él se obtienen las ventajas siguientes:

a. La impregnación a fondo del barniz aislante y una gran compacidad y resistencia mecánica del devanado.

b. La eliminación total de toda la humedad del devanado, aun en las capas más profundas del mismo, así como la eliminación total del aire ocluido.

c. Una mejor calidad del aislamiento obtenido, que permanece en el tiempo sin alteración alguna.

d. Una mayor resistencia a: los choques, las vibraciones y los efectos electrodinámicos, así como una mayor protección a los agentes medioambientales.

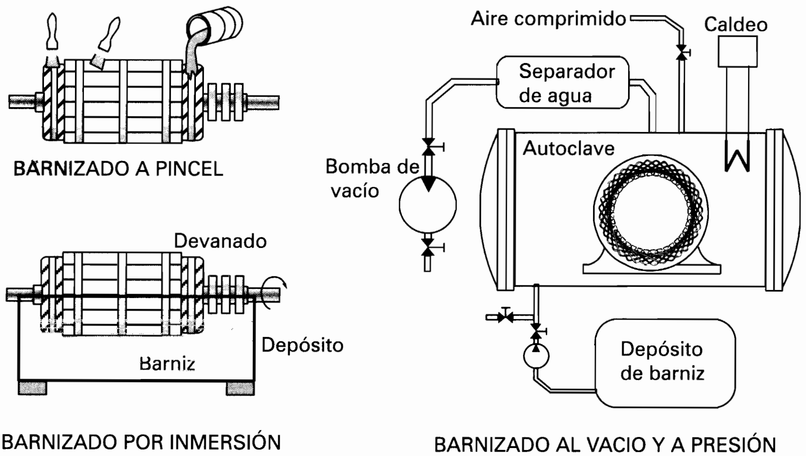


Figura 11.6. Barnizado de devanados eléctricos.

El proceso de barnizado, por este sistema de vacío y a presión, es algo distinto a los anteriormente enumerados. Se suele hacer en cuatro fases, generalmente, como las descritas a continuación:

– **Secado previo del devanado**. Éste se puede realizar en horno aparte o en el propio autoclave o cuba de impregnación y secado. En el primer caso se calienta entre 110° y 120°, durante unas horas, dependiendo del tamaño del devanado, hasta que quede totalmente exento de humedad. Si el secado se realiza en el propio autoclave, se calienta a unos 110° y, por medio de la bomba, se realiza el vacío (a 1 bar ó 750 mm de columna de mercurio), manteniendo la temperatura y el vacío durante unas horas, dependiendo del tamaño de la máquina. A continuación, y en ambos casos, se desconecta la

bomba de vacío y se deja enfriar hasta que el devanado alcance los 35º o 50º aproximadamente, antes de proceder al barnizado.

- **Impregnación al vacío y a presión**. Después de secado el devanado y con éste aun caliente, se produce de nuevo el vacío en la cuba y, cuando se haya completado, se desconecta la bomba de vacío y se inyecta el barniz, procurando que cubra completamente todos los arrollamientos. Durante este proceso es conveniente que el vacío sea al menos de unos 0,5 bar ó 350 mm de mercurio, para que el barniz pueda penetrar hasta los últimos rincones del devanado.

  Por lo general, se reconoce que el barniz ha penetrado suficientemente, cuando dejan de aparecer burbujas en su superficie, en un proceso que suele durar entre 30 minutos y 1,5 horas, dependiendo del tamaño del devanado.

- **Escurrido**. Una vez seguros de que el devanado ha sido impregnado convenientemente, se inyecta aire a presión en la cuba o autoclave, para facilitar el primer escurrido del barniz. El barniz de este primer escurrido, que puede durar una hora, se recoge de nuevo en el depósito para su posterior reutilización.

  Para mejorar el escurrido del barniz sobrante, es conveniente elevar de nuevo la temperatura a unos 70º u 80º y hacer de nuevo el vacío, el barniz sobrante de este segundo escurrido, al vacío y en caliente, no es conveniente reutilizarlo de nuevo, por haber sido alterado en su composición, debido a la temperatura.

- **Secado final**.Una vez que el devanado esté completamente escurrido, se eleva de nuevo la temperatura del autoclave o cuba, entre 120º y 200º, de acuerdo con el tipo de barniz y recomendaciones del fabricante, produciendo de nuevo un vacío, de entre 0,5 bar ó 400 mm de mercurio. Manteniendo la temperatura durante una hora o algo más, el vacío habrá alcanzado la cota de 1 bar ó 750 mm de columna de mercurio, aproximadamente.

  Seguidamente se termina de secar el barniz, a la temperatura y el tiempo recomendado por el fabricante, hasta su total curación o polimerización. Este proceso final de secado y curación puede realizarse en horno aparte, en vez de en el propio autoclave o cuba de impregnación, con el fin de aumentar el rendimiento y la vida de éste.

12

MODIFICACIÓN DE DEVANADOS ELÉCTRICOS DE CORRIENTE ALTERNA

12.1. CAMBIO DE TENSIÓN

Dado que la tensión en bornes de una máquina de corriente alterna es proporcional al número de espiras en serie por fase y a la frecuencia de la corriente de alimentación, para el cambio de tensión debe modificarse alguna de estas dos variables. La relación entre unas variables y otras nos viene dada por la misma relación de transformación, empleada para los transformadores eléctricos, que se obtiene a partir de las fuerzas electromotrices inducidas en bobinas, de un determinado número de espiras N:

$$\frac{\textit{f.e.m. inducida en el primario:}}{\textit{f.e.m. inducida en el secundario:}} \quad \frac{Vp}{Vs} = \frac{4.44\ Np \cdot f \cdot \Phi}{4.44\ Ns \cdot f \cdot \Phi} = \frac{Np}{Ns}$$

La intensidad de corriente, por el contrario, ha de ser inversamente proporcional a la tensión de funcionamiento del motor, con lo cual las relaciones completas entre los devanados primario y secundario de un transformador son:

$$\frac{Vp}{Vs} = \frac{Np}{Ns} = \frac{Is}{Ip} = m$$

Por tanto, si consideramos que el número de espiras eficaces en un determinado devanado es el número de espiras conectadas en serie, por fase, y llamando: N al número de espiras actual y N' al número de espiras futuro, si además consideramos como: V a la tensión actual y V' la tensión prevista, e I a la intensidad actual e I' a la futura, podemos aplicar las mismas relaciones para el cambio de la tensión de trabajo de un motor o generador:

$$\frac{V}{V'} = \frac{N}{N'} = \frac{I'}{I}; \textit{ Espiras para la nueva tensión: } N' = N\,\frac{V'}{V}$$

Por la misma relación podemos determinar la nueva intensidad ***I´*** que circulará por el nuevo devanado. Pero como en la práctica los hilos empleados en los devanados se suelen medir por su diámetro o sección (ver capítulo 6, tabla 6.2, de esta obra), en vez de trabajar con las intensidades, podemos trabajar directamente con la sección de los conductores necesaria. Así llamando ***S*** a la sección actual y ***S´***a la sección futura tendremos:

Intensidad para la nueva tensión: $I' = I \dfrac{V}{V'}$; *Nueva sección:* $S' = S \dfrac{V}{V'}$

Si partimos del diámetro de los conductores, siempre que sean éstos circulares, podemos obtener la sección de los mismos por medio de la fórmula siguiente:

Sección de un conductor en función del diámetro: $S = \pi \cdot r^2 = \dfrac{\pi \cdot d^2}{4} = 0{,}785\ d^2$

Para todos estos cálculos, dado que la mayoría de los motores de corriente alterna pueden trabajar con dos tensiones distintas, una en estrella y la otra en triángulo, hemos de partir de tensiones de fase o bien referidas al mismo tipo de conexión.

Por otra parte, también sabemos que la densidad de corriente que puede circular por un conductor disminuye al aumentar su sección, el espesor de su aislamiento, así como de la velocidad del motor y de la ventilación del mismo, pudiendo llegar en los motores normales desde 2 a 6 A/mm^2 aproximadamente. Por tanto, una vez obtenidas las nuevas intensidades y secciones del conductor, para la nueva tensión

TABLA 12.1. Intensidades máximas, de los hilos de cobre para devanados de B.T.

Diámetro en mm	Sección en mm^2	Intensidad, en A	Diámetro en mm	Sección en mm^2	Intensidad, en A	Diámetro en mm	Sección en mm^2	Intensidad, en A
0,25	0,049	0,30	1,80	2,545	12	2,60	5,309	26
0,40	0,125	0,70	1,90	2,835	14	2,80	6,157	28
0,60	0,283	1,60	2,00	3,142	16	3,00	7,069	31
0,80	0,503	2,60	2,10	3,463	18	3,20	8,042	33
1,00	0,785	4,00	2,20	3,801	19	3,40	9,079	36
1,20	1,131	5,5	2,30	4,155	20	3,60	10,178	40
1,40	1,539	7	2,40	4,539	22	3,80	11,341	46
1,60	2,011	10	2,50	4,909	24	4,00	12,566	51

de funcionamiento, podemos ajustarlas, por medio de tablas, iguales o similares a la 12.1, referida ésta a motores bien ventilados y de baja tensión. Estos ajustes pueden ser necesarios para que el total de espiras por bobina entre perfectamente en el hueco de las ranuras, sin detrimento de la sección óptima necesaria, para el buen funcionamiento y calentamiento de la máquina.

Cuando los cálculos obtenidos implican un gran inconveniente para poder alojar las nuevas espiras en las ranuras, se puede recurrir también al empleo de varios hilos en paralelo, si con ello es más fácil la colocación de las bobinas en las ranuras, siempre que se respeten las secciones mínimas del nuevo conductor. Esto se puede conseguir fácilmente ayudándose de la tabla 6.3, de esta misma obra.

Veámoslo todo con un ejemplo numérico:

Ejemplo 12.1. Calcular el número de espiras y las medidas del conductor, para un motor, asíncrono trifásico, tetrapolar, de 10 KW de potencia, que trabaja actualmente a 500 V conectado en estrella, que se desea rebobinar para trabajar con las tensiones normalizadas de 220/380 V. Actualmente tiene: cuatro grupos de dos bobinas cada uno por fase, cada bobina tiene 21 espiras de hilo de 1,80 mm de diámetro, equivalente a 2,544 mm^2 de sección.

Como la tensión actual de 500 V actúa en conexión estrella, hemos de tomar como referencia de cálculo la tensión de 380 V, correspondiente a la conexión estrella deseada, o bien pasar las dos a tensiones de fase.

- ***Número de espiras en serie por fase, a 500 V:*** *N = 4 grupos x 2 bobinas x 21 espiras = 168 espiras*
- ***Nuevo número de espiras en serie por fase:***

$$N' = N \frac{V'}{V} = 168 \frac{380\ V}{500\ V} = 127{,}68 = 128 \text{ espiras}$$

- ***Número de espiras por bobina:*** $= \dfrac{128 \text{ espiras}}{4 \text{ grupos x } 2 \text{ bobinas}} = 16$ *espiras por bobina*

Si el devanado es entero, también se puede partir directamente del número de espiras por bobina, sin temor alguno, pero como norma general, es mejor partir del total de espiras en serie por fase y luego distribuirlas por bobinas, en función del tipo de devanado.

Seguidamente se calculará la nueva sección del hilo de las bobinas, directamente en este caso, ya que tenemos la sección actual:

– ***Nueva sección del hilo:*** $S' = S \dfrac{V}{V'} = 2{,}545\ mm^2 \dfrac{500\ V}{380\ V} = 3{,}348\ mm^2$

Esta nueva sección se corresponde con un diámetro de hilo de:

– ***Diámetro del nuevo hilo:*** $d' = \sqrt{4S'/\pi} = \sqrt{(4 \times 3{,}348\ mm^2)/3{,}14} = 2{,}06\ mm$

Se realizarán las nuevas bobinas con hilo de cobre normalizado de 2,10 mm de diámetro.

12.2. CAMBIO DE FRECUENCIA

Si quisiéramos cambiar la frecuencia de trabajo de un motor o generador, manteniendo la tensión constante –aunque esto no es habitual dada la normalización de la frecuencia industrial– puede resultar tan fácil como lo anteriormente expuesto para el cambio de tensión a frecuencia constante, ya que según se aprecia en las fórmulas que nos dan la f.e.m. inducida, tanto la frecuencia ***(f)*** como el número de espiras ***(N)*** son dos variables, que actúan de igual forma:

f.e.m. inducida en el primario:
f.e.m. inducida en el secundario:

$$\frac{Vp}{Vs} = \frac{4.44\ Np \cdot f \cdot \Phi}{4.44\ Ns \cdot f \cdot \Phi}$$

De otro modo, en corriente alterna, la impedancia de las bobinas también varía con la frecuencia, siendo directamente proporcional a la misma y, por tanto, se reduce la intensidad al aumentar la frecuencia. Así, llamando ***(f)*** a la frecuencia actual y ***(f ´)*** a la frecuencia futura, tendremos las relaciones siguientes:

$$\frac{N}{N'} = \frac{V}{V'} = \frac{f'}{f}; \quad \frac{S}{S'} = \frac{I}{I'} = \frac{f}{f'}$$

Como se aprecia en las relaciones anteriores: el número de espiras en serie por fase es inversamente proporcional al valor de la frecuencia, mientras que la intensidad y, por tanto, la sección del conductor, son directamente proporcionales al valor de la frecuencia. Por este motivo, al igual que hacíamos con el cambio de tensión de un motor, los nuevos valores de: número de espiras ***N´*** y de sección del conductor ***S´***, los obtendremos de las fórmulas siguientes:

Espiras para la nueva frecuencia: $N' = N \dfrac{f}{f'}$

Intensidad para la nueva frecuencia: $I' = I \dfrac{f'}{f}$; *Nueva sección:* $S' = S \dfrac{f'}{f}$

Muy importante. Todo cambio de frecuencia en un motor, aunque se mantenga su tensión, afecta directamente a su potencia y a la velocidad de giro del mismo, ya que como sabemos: la potencia de un motor asíncrono de corriente alterna depende de la intensidad absorbida y su velocidad depende de la frecuencia de la red, según las fórmulas siguientes:

Potencia activa: $P = V \cdot I \cdot \cos\varphi$; *ó* $P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi$; *Velocidad:* $n = \dfrac{f \cdot 60}{p}$

Por lo cual al ser afectados ambos valores, durante el cambio de la frecuencia de un motor, la potencia ***(P)***, que es directamente proporcional a la intensidad ***(I)*** y la velocidad ***(n)***, que es directamente proporcional a la frecuencia ***(f)***, adquirirán los nuevos valores siguientes:

$$\frac{P}{P'} = \frac{f}{f'}\text{; Nueva potencia: } \mathbf{P'} = P\,\frac{f'}{f}$$

$$\frac{n}{n'} = \frac{f}{f'}\text{; Nueva velocidad: } \mathbf{n'} = n\,\frac{f'}{f}$$

Veámoslo todo, de nuevo, con un ejemplo numérico:

Ejemplo 12.2. Sea el mismo motor del ejemplo 12.1, asíncrono trifásico, tetrapolar, de 10 KW de potencia, alimentado a 500 V, el cual en vez de cambiarle su tensión de alimentación, es necesario modificarlo para pasar de una frecuencia de 60 Hz a otra frecuencia de 50 Hz. Determinar: su nuevo número de espiras en serie por fase, la nueva sección de los conductores necesaria, la nueva potencia que suministrará el motor y su nueva velocidad.

Recordamos aquí que en su actual constitución tiene: 168 espiras, en serie por fase, correspondientes a 21 espiras por bobina, estando éstas formadas por un hilo cilíndrico de 2,544 mm^2 de sección o 1,80 mm de diámetro.

Al ser tetrapolar, su velocidad actual será: $\mathbf{n} = \dfrac{f \cdot 60}{p} = \dfrac{60\ Hz \cdot 60}{2} = 1800$ r.p.m., teóricas

Primeramente calcularemos el nuevo número de espiras, en serie por fase, y la nueva sección del conductor, que ha de tener el devanado, por ser los dos datos necesarios para su rebobinado:

– ***Espiras para la nueva frecuencia:*** $\mathbf{N'} = N\,\dfrac{f}{f'} = 168\,\dfrac{60\ Hz}{50\ Hz} = 201{,}6$

Tomaremos 200 espiras en serie por fase o: 200 esp. / (4 grupos x 2 bobinas) = 25 espiras por bobina

– ***Nueva sección:*** $S' = S \dfrac{f'}{f} = 2{,}544\ mm^2\ \dfrac{50\ Hz}{60\ Hz} = 2{,}12\ mm^2$ *(Hilo de 1,60 mm de diámetro)*

Seguidamente se determinarán los nuevos valores de potencia y velocidad, que originará el cambio de frecuencia:

– ***Nueva potencia:*** $P' = P \dfrac{f'}{f} = 10\ KW\ \dfrac{50\ Hz}{60\ Hz} = 8{,}33\ KW$

– ***Nueva velocidad:*** $n' = n \dfrac{f'}{f} = 1800\ r.p.m.\ \dfrac{50\ Hz}{60\ Hz} = 1500\ r.p.m.$

12.3. CAMBIO DE VELOCIDAD

Como todos sabemos, el cambio de velocidad de un motor asíncrono, ya sea éste monofásico o trifásico, implica el cambio del número de polos del mismo y, por tanto, su rebobinado; ya que éste requerirá diferente número de grupos y de bobinas, por ser su velocidad inversamente proporcional a su número de pares de polos, a través de la fórmula ya conocida de:

$$\text{Velocidad: } n = \frac{f \cdot 60}{p} = r.p.m.;\quad \text{Cumpliéndose que: } p \cdot n = p' \cdot n'$$

A primera vista parece fácil el cambio del número de polos, pero en la práctica no siempre resulta bien, ya que al variar el número de polos se altera: el ancho de las bobinas y también la longitud del arco polar y, consecuentemente, también pueden ser alteradas la distribución de la inducción y del flujo magnético por polo, ya que existen menos pérdidas cuanto más concentrado está el devanado y los fabricantes ajustan las medidas del núcleo magnético a las características de la máquina. Esto puede traer como consecuencia un comportamiento anómalo y una disminución o un mal aprovechamiento de la potencia del motor. Por tanto, solamente se podrá cambiar, con éxito, la polaridad de un motor, cuando las características físicas de la distribución de los grupos de bobinas, antes y después del cambio, no sean muy diferentes.

En las fórmulas de la f.e.m. inducida en un generador o de la tensión aplicada a un motor, vistas anteriormente, se aprecia que cuando se mantiene constante la tensión de alimentación y la frecuencia, quedan como variables el número de espiras N y el flujo Φ. A su vez se ha introducido un nuevo valor que denominamos factor de devanado k, este factor engloba a otros dos denominados generalmente factor de distribución k_d y factor de ancho de bobina k_p, ambos inferiores a la unidad; el primero disminuye al aumentar la extensión de la zona en la que se distribuyen las

espiras de un devanado; así por ejemplo tendremos: $k_d = 0{,}955$ como máximo para devanados trifásicos y $k_d = 0{,}90$ para devanados bifásicos o monofásicos, mientras que el segundo $\boldsymbol{k_p}$ disminuye al acortar el paso de ranura o ancho de bobina, con respecto al paso polar, valiendo uno cuando el paso de bobina es igual al paso polar y disminuyendo al acortarlo. Así realmente tendríamos:

$$\textit{f.e.m. inducida: } \boldsymbol{E}\,(V) = 4.44\, N \cdot f \cdot \Phi \cdot k$$

Ante esto, pueden no dar buen resultado los cambios de polaridad que impliquen: un cambio del número de fases o una ejecución que implique una extensión muy desigual de los grupos de bobinas, así como un acortamiento excesivo del paso de bobina, ya que al aumentar la amplitud o el arco polar ocupado por los grupos de bobinas, disminuye el factor de devanado $\boldsymbol{k}$. Si son posibles y darán buen resultado, por ejemplo, los cambios de un motor trifásico de cuatro a seis polos, de seis a ocho, o viceversa; pero no de ocho a dos polos.

Por tanto, para el buen funcionamiento de la máquina, el producto del número de espiras en serie por fase $\boldsymbol{N}$ y el valor del flujo máximo por polo $\boldsymbol{\Phi}$ debe de ser igual, antes y después de la reforma, tanto con una como con otra polaridad y además el factor de devanado $\boldsymbol{k}$ no puede variar grandemente. Esto implica que para el cambio de la polaridad de un motor y, prescindiendo del factor de devanado, es necesario cambiar también el número de espiras en serie por fase, ya que éstas son inversamente proporcionales al valor de los flujos y éstos al número de polos de la máquina, según se aprecia en las relaciones siguientes:

$$\textit{Relaciones entre flujos: } \Phi \cdot N = \Phi' \cdot N'; \quad \Phi \cdot 2p = \Phi' \cdot 2p'$$

Siendo: N y N´: número de espiras actual y futuro; Φ y Φ´: flujo actual y futuro; 2p y 2p´: número de polos actual y futuro.

Así el valor del número de espiras, en serie por fase, con la nueva polaridad será:

$$\textit{Nuevo número de espiras: } N' = N \,\frac{2p'}{2p}$$

Como en los casos anteriores, de cambio de velocidad y frecuencia, la modificación del número de espiras lleva implícita la modificación de la sección del conductor, en relación inversa al número de éstas, la sección del conductor de las nuevas bobinas, que se deriva también del cambio del número de polos será:

$$\textit{Nueva sección del conductor: } S' = S \,\frac{2p}{2p'}$$

Al igual que ocurría durante el cambio de la frecuencia de un motor, la potencia suministrada por el motor ***(P)***, que es directamente proporcional a la intensidad ***(I)***, también se verá modificada, adquiriendo el siguiente valor:

$$\frac{P}{P'} = \frac{2p'}{2p} \; ; \quad \textit{Nueva potencia: } \mathbf{P'} = P \, \frac{2p}{2p'}$$

Veámoslo todo con un ejemplo concreto:

Ejemplo 12.3. Sea un motor asíncrono trifásico, tetrapolar (1500 r.p.m.), de 12 Kw, 220/380 V, de 36 ranuras, con un devanado, ejecutado a doble capa, de 144 espiras en serie por fase, de hilo de 3,2 mm de diámetro (8 mm^2), distribuidas en cuatro grupos de tres bobinas cada uno; que se desea transformar en otro exapolar (1000 r.p.m.). Calcular: el nuevo número de espiras en serie por fase y la sección del conductor que han de tener éstas, así como la nueva potencia que proporcionará el motor y dibujar ambos esquemas, siendo ambos ejecutados por polos, y el de seis polos a una capa por ranura.

Primeramente calcularemos el nuevo número de espiras, en serie por fase, y la nueva sección del conductor, que ha de tener el devanado, por ser los dos datos necesarios para su rebobinado:

Nuevo número de espiras:

$$N' = N \, \frac{2p'}{2p} = 144 \, \frac{6}{4} = 216 \textit{ espiras (6 bobinas de 36 espiras, por fase)}$$

Nueva sección del conductor:

$$S' = S \, \frac{2p}{2p'} = 8 \, mm^2 \, \frac{4}{6} = 5{,}33 \, mm^2 \textit{ (2,6 mm de diámetro)}$$

Como parte negativa, de esta transformación de 1500 r.p.m. a 1000 r.p.m., tendremos una disminución de la potencia del motor, de 12 a 8 KW, según los cálculos siguientes:

$$\textit{Nueva potencia: } \mathbf{P'} = P \, \frac{2p}{2p'} = 12 \, KW \, \frac{4}{6} = 8 \, KW$$

o algo inferior, debido a que la disminución de la velocidad disminuye la refrigeración de la máquina.

Seguidamente, en la figura 12.1, se ven los esquemas correspondientes a los dos devanados, el primero de 4 polos, 1500 r.p.m. y ejecutado a doble capa, y el segundo de 6 polos y 1000 r.p.m., ejecutado a una capa por ranura.

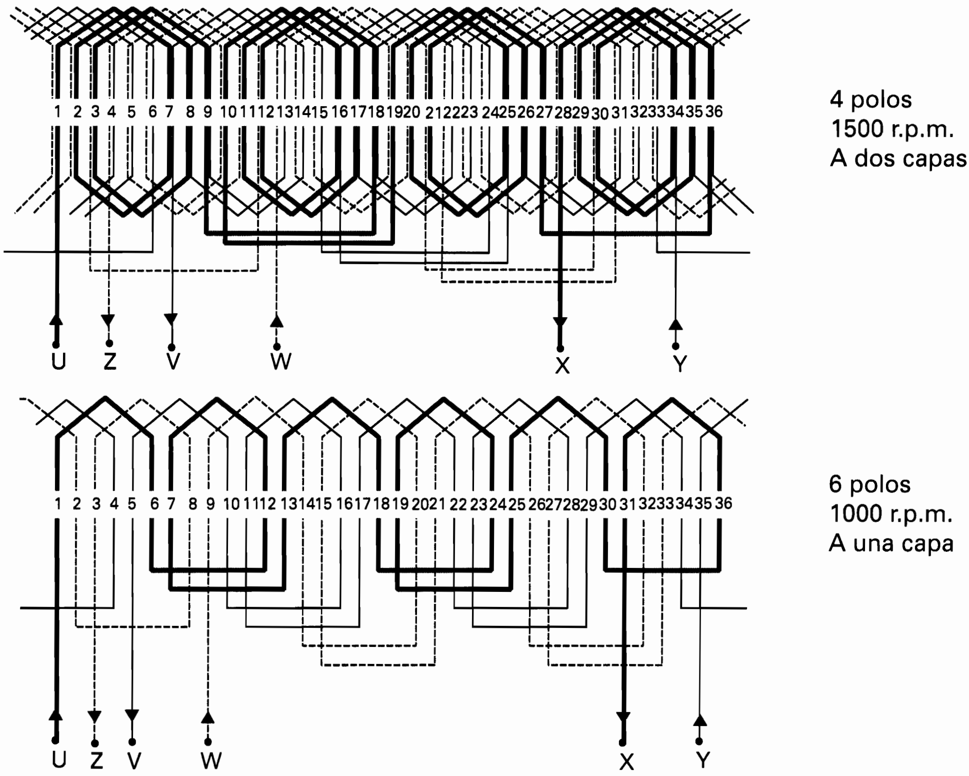


Figura 12.1. Esquemas de los devanados imbricados enteros, trifásicos, tetrapolar y exapolar, ejecutados por polos, del ejemplo 12.3.

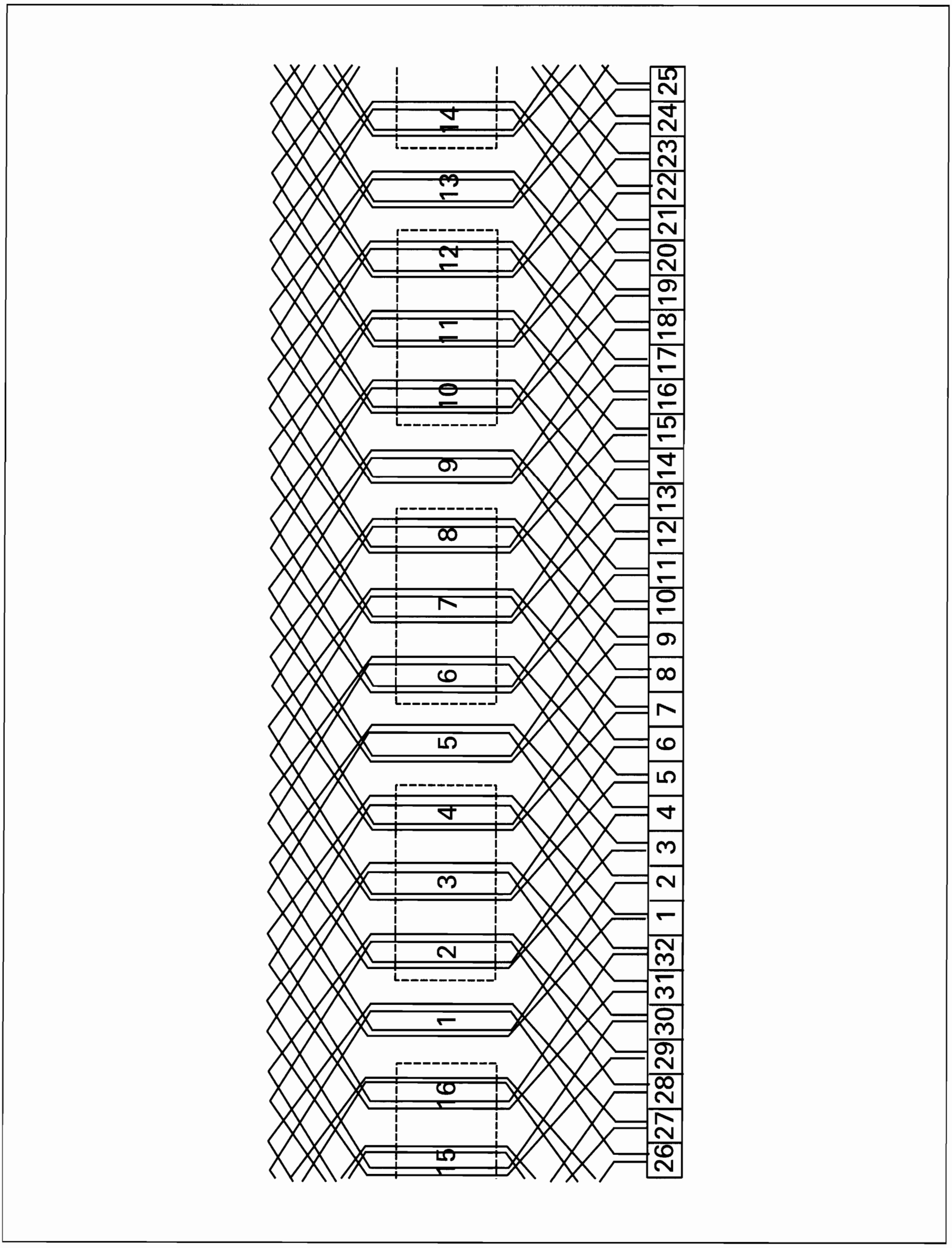
13

APÉNDICE
ESQUEMAS DE DEVANADOS

A continuación y para completar esta obra, se han dibujado 49 esquemas de devanados eléctricos, de todo tipo y condición, unos pertenecientes a máquinas de corriente continua y otros a máquinas de corriente alterna, referidos todos ellos a máquinas con características muy comunes a los más utilizados industrialmente. Primeramente se incluyen los de corriente continua y, a continuación, los de corriente alterna.

Los devanados se han dibujado de forma apaisada para poder apreciar mejor todos sus detalles y se han consignado, al final de cada página, las características eléctricas y de tipo de devanado más significativas de todos ellos.

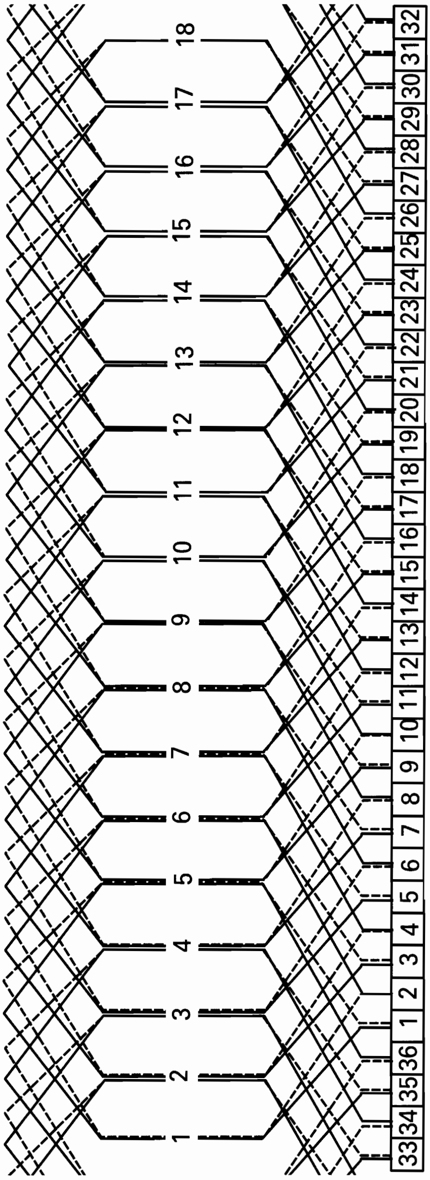
Con esto se pretende facilitar a los lectores el aprendizaje y diseño de los devanados eléctricos, así como los trabajos de bobinado y rebobinado que diariamente ejecutan los profesionales.



Esquema c.c. 13.1. Devanado imbricado simple, para inducido, ejecutado sin cruzar

K = 16 ; D = 32 ; 2p = 4 ; U = 2

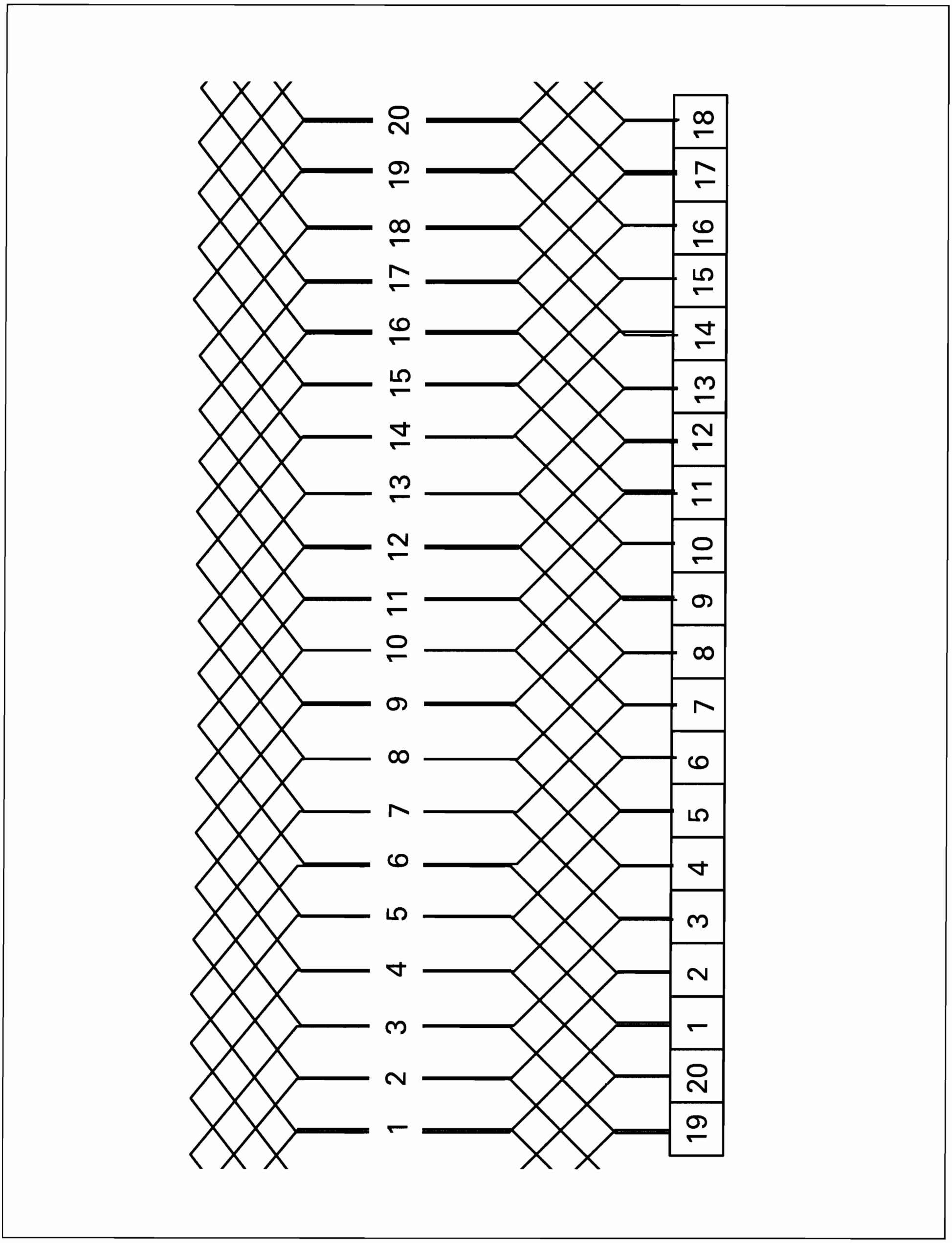
Yk = K / 2p = 4 ; Y col = Y1 - Y2 = 1 ; Y1 = Yk · U = 8 ; Y2 = Y1 - Y col = 7



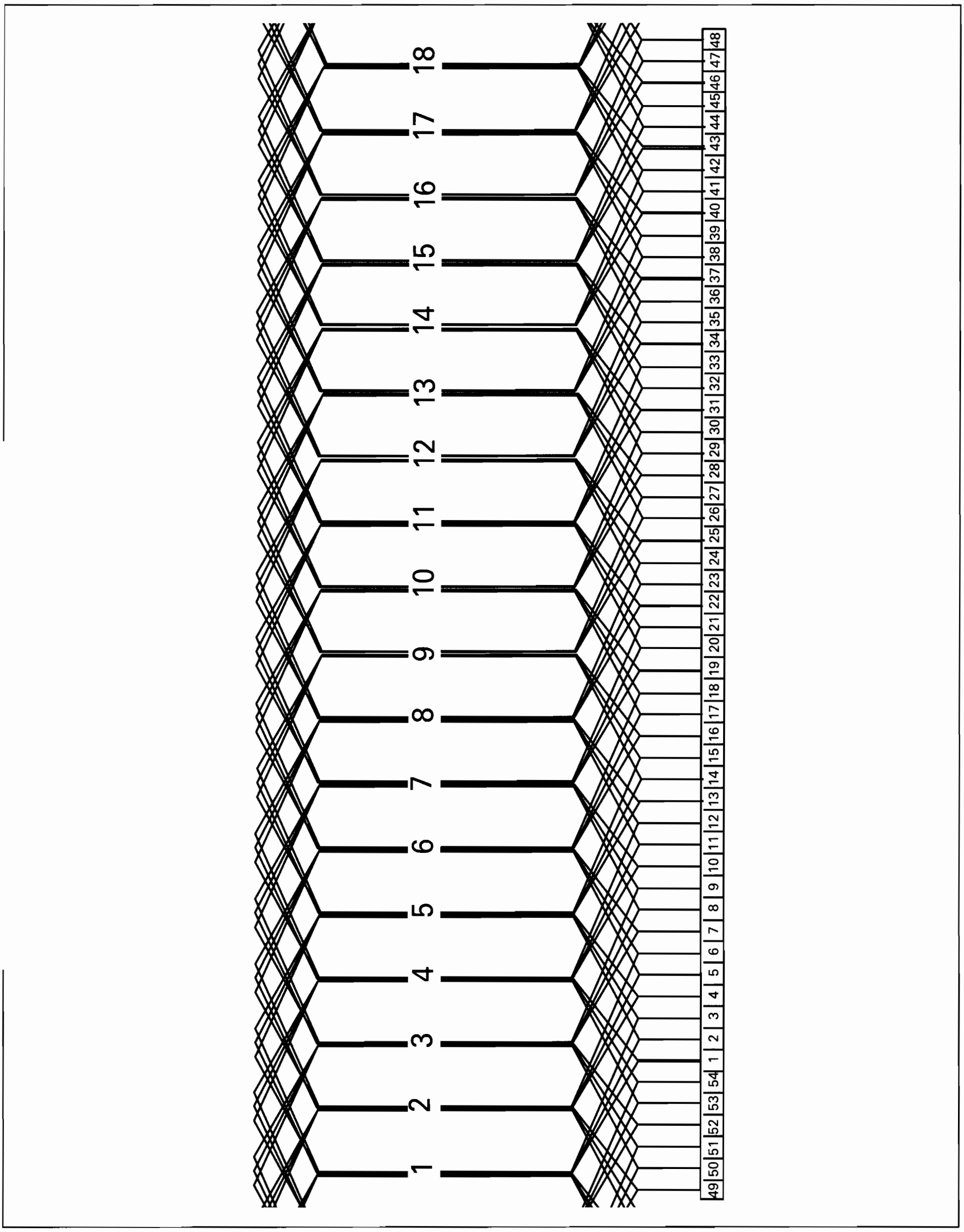
Esquema c.c. 13.2. Devanado imbricado simple, para inducido, ejecutado cruzado y con paso acortado

K = 18 ; D = 36 ; 2p = 4 ; U = 2

Yk = K / 2p = 4 ; Y col = Y1 - Y2 = -1 ; Y1 = Yk · U = 8 ; Y2 = Y1 - Y col = 9



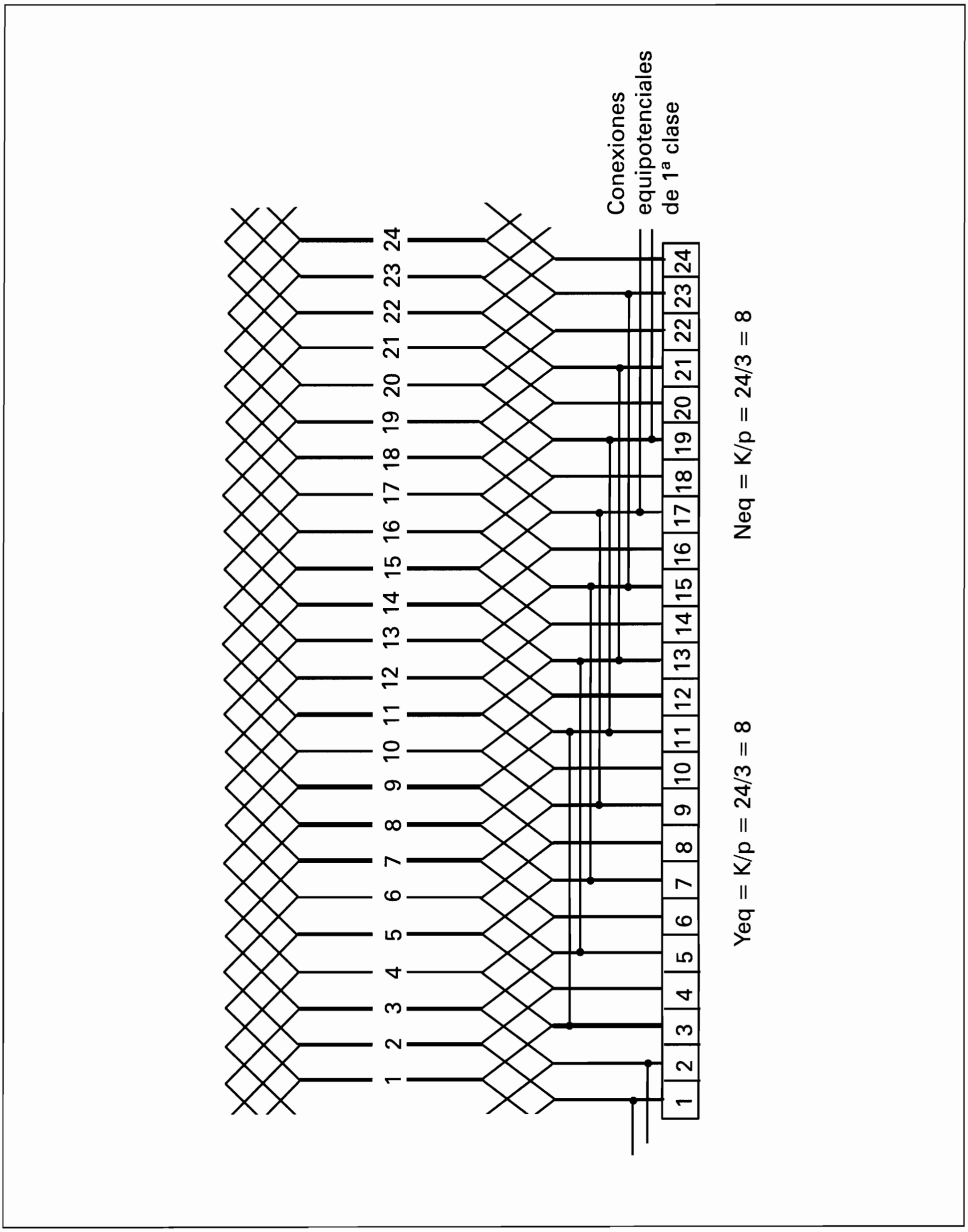
Esquema c.c. 13.3. Devanado imbricado simple, para inducido, ejecutado sin cruzar
K = 20 ; D = 20 ; 2p = 4 ; U = 1
Yk = K / 2p = 5 ; Y col = Y1 - Y2 = 1 ; Y1 = Yk · U = 5 ; Y2 = Y1 - Y col = 4



Esquema c.c. 13.4. Devanado imbricado simple, para inducido, ejecutado sin cruzar y con paso acortado

$K = 18$; $D = 54$; $2p = 4$; $U = 3$

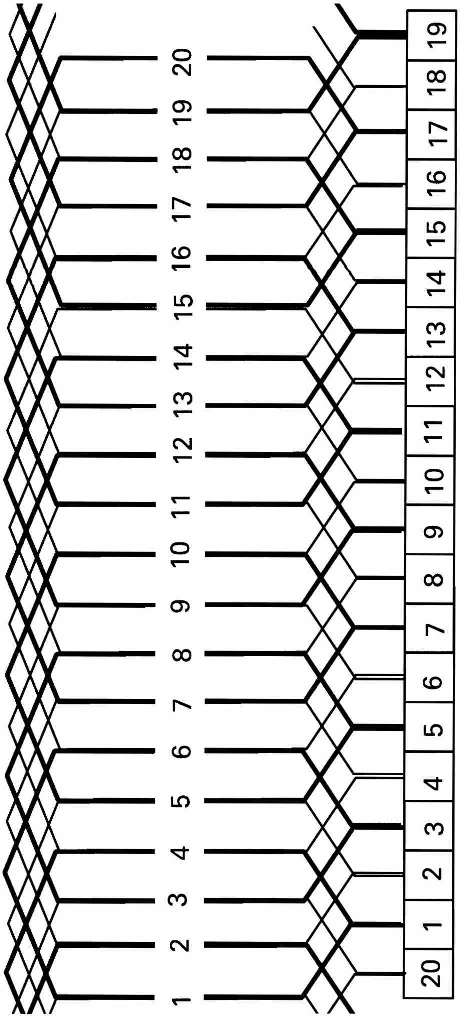
$Yk = K / 2p = 4{,}5$; $Y\,col = Y1 - Y2 = 1$; $Y1 = Yk \cdot U = 12$; $Y2 = Y1 - Y\,col = 11$



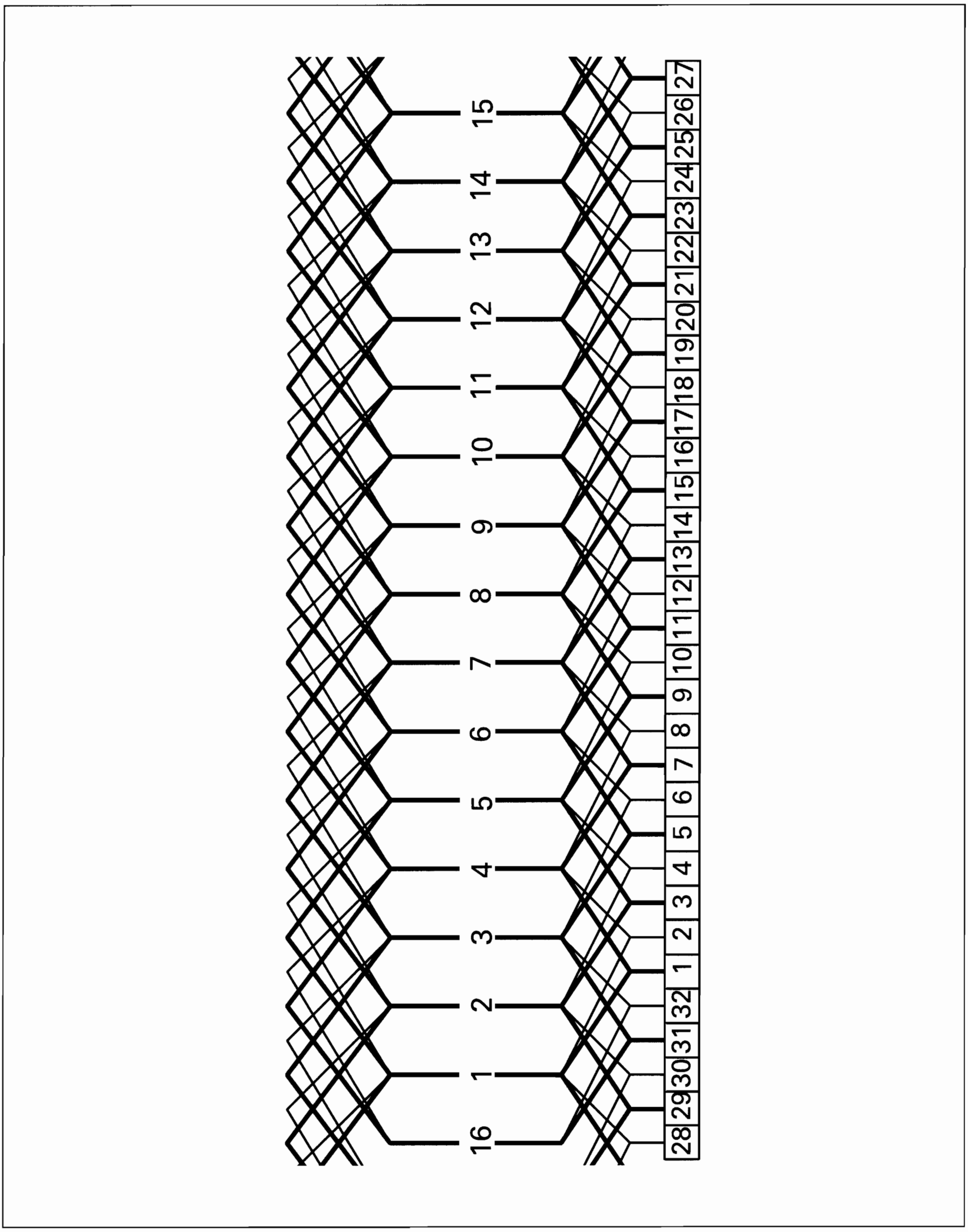
Esquema c.c. 13.5. Devanado imbricado simple, ejecutado sin cruzar y con conexiones equipotenciales de primera clase

K = 24 ; D = 24 ; 2p = 6 ; U = 1

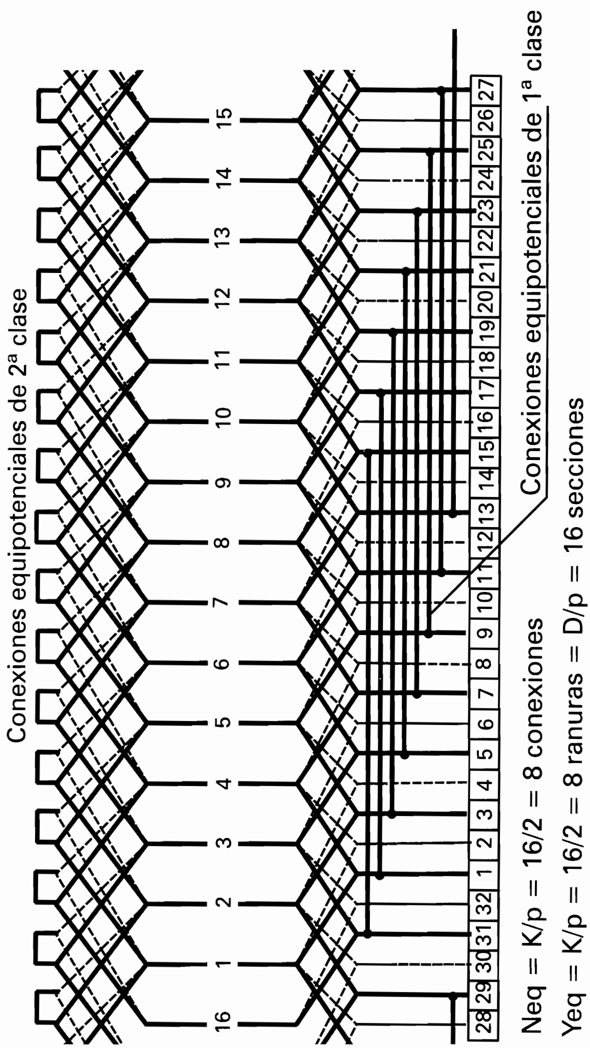
Yk = K / 2p = 4 ; Y col = Y1 - Y2 = 1 ; Y1 = Yk · U = 4 ; Y2 = Y1 - Y col = 3



Esquema c.c. 13.6. Devanado imbricado doble, ejecutado sin cruzar
K = 20 ; D = 20 ; 2p = 4 ; U = 1
Yk = K / 2p = 5 ; Y col = Y1 - Y2 = 2 ; Y1 = Yk · U = 5 ; Y2 = Y1 - Y col = 3



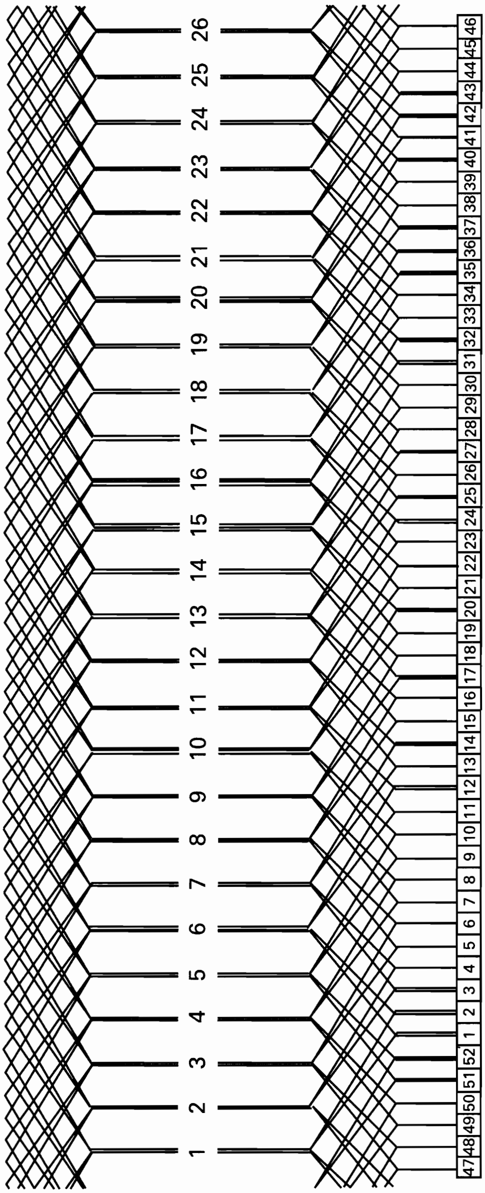
Esquema c.c. 13.7. Devanado imbricado doble, ejecutado sin cruzar
K = 16 ; D = 32 ; 2p = 4 ; U = 2
Yk = K / 2p = 4 ; Y col = Y1 – Y2 = 2 ; Y1 = Yk · U = 8 ; Y2 = Y1 – Y col = 6



Esquema c.c. 13.8. Devanado imbricado doble, ejecutado sin cruzar y con conexiones equipotenciales de primera y segunda clase

K = 16 ; D = 32 ; 2p = 4 ; U = 2

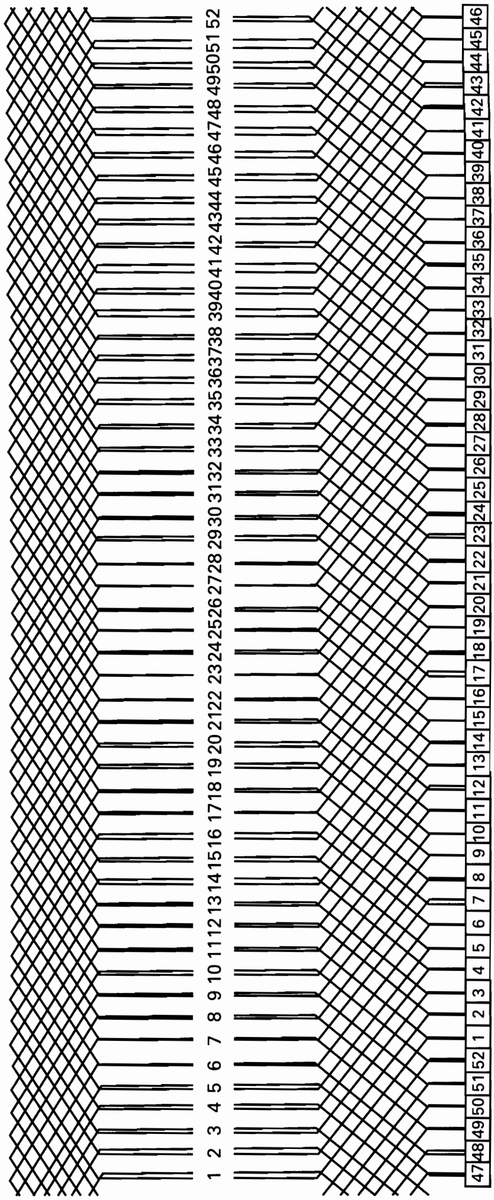
Yk = K / 2p = 4 ; Y col = Y1 - Y2 = 2 ; Y1 = Yk · U = 8 ; Y2 = Y1 - Y col = 6



Esquema c.c. 13.9. Devanado imbricado doble, ejecutado sin cruzar y con paso acortado

K = 26 ; D = 52 ; 2p = 4 ; U = 2

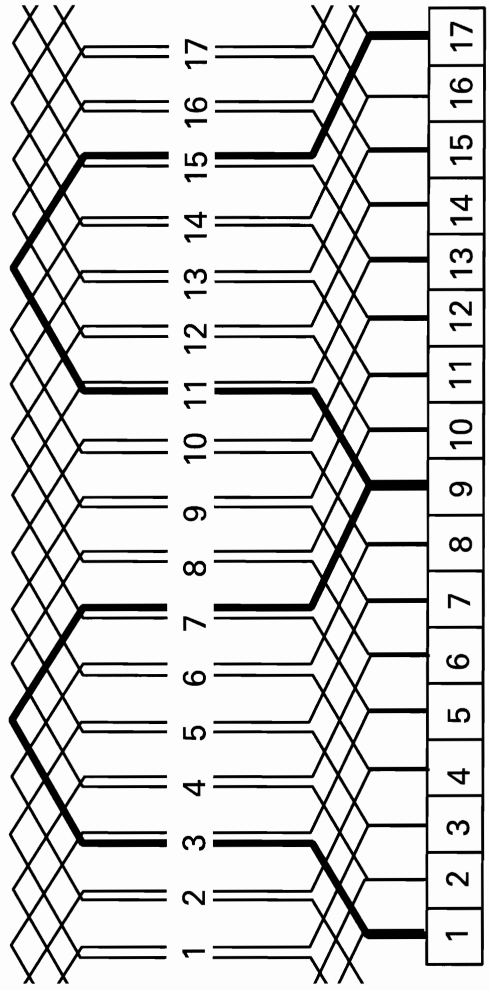
Yk = K / 2p = 6,5 ; Y col = Y1 - Y2 = 2 ; Y1 = Yk · U = 12 ; Y2 = Y1 - Y col = 10



Esquema c.c. 13.10. Devanado imbricado doble, para inducido, ejecutado sin cruzar y con paso acortado

K = 52 ; D = 52 ; 2p = 4 ; U = 2

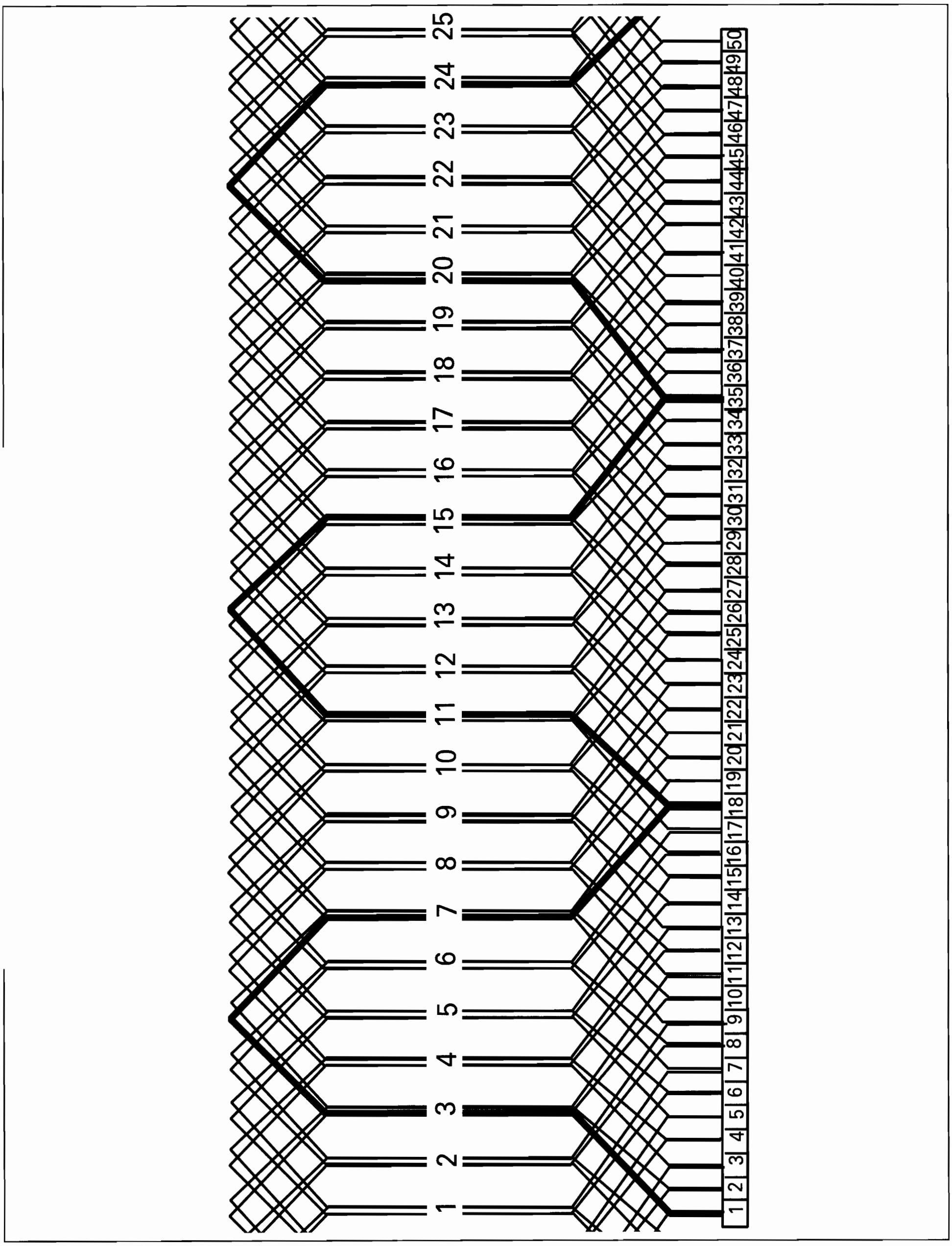
Yk = K / 2p = 13 ; Y col = Y1 - Y2 = 2 ; Y1 = Yk · U = 26 ; Y2 = Y1 - Y col = 24



Esquema c.c. 13.11. Devanado ondulado simple, para inducido, ejecutado sin cruzar y con paso acortado

K = 17 ; D = 17 ; 2p = 4 ; U = 1

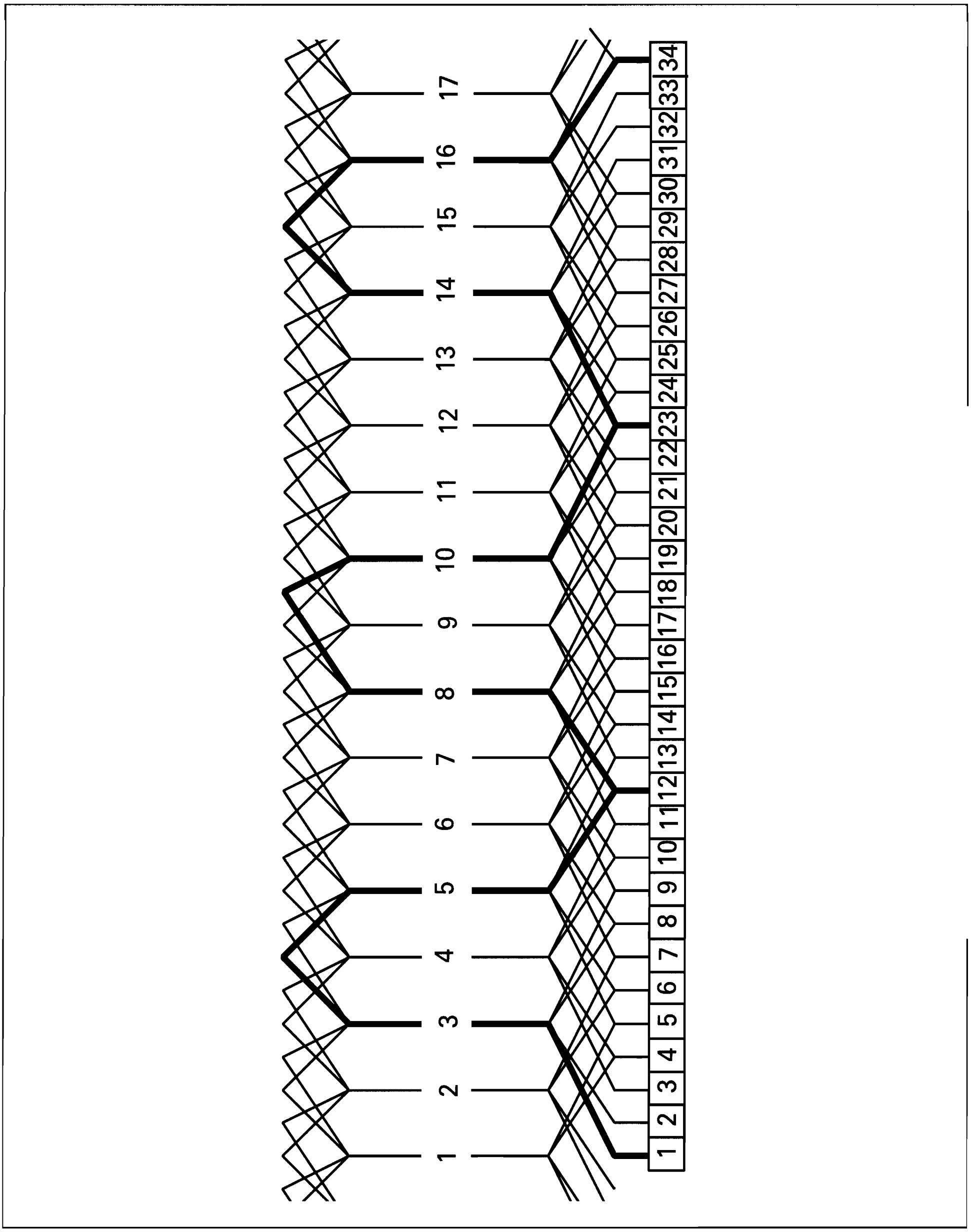
Yk = K / 2p = 4,25 ; Y col = Y1 + Y2 = 8 ; Y1 = Yk · U = 4 ; Y2 = Y col – Y 1 = 4



Esquema c.c. 13.12. Devanado ondulado simple, ejecutado cruzado y con paso acortado

K = 25 ; D = 50 ; 2p = 6 ; U = 2

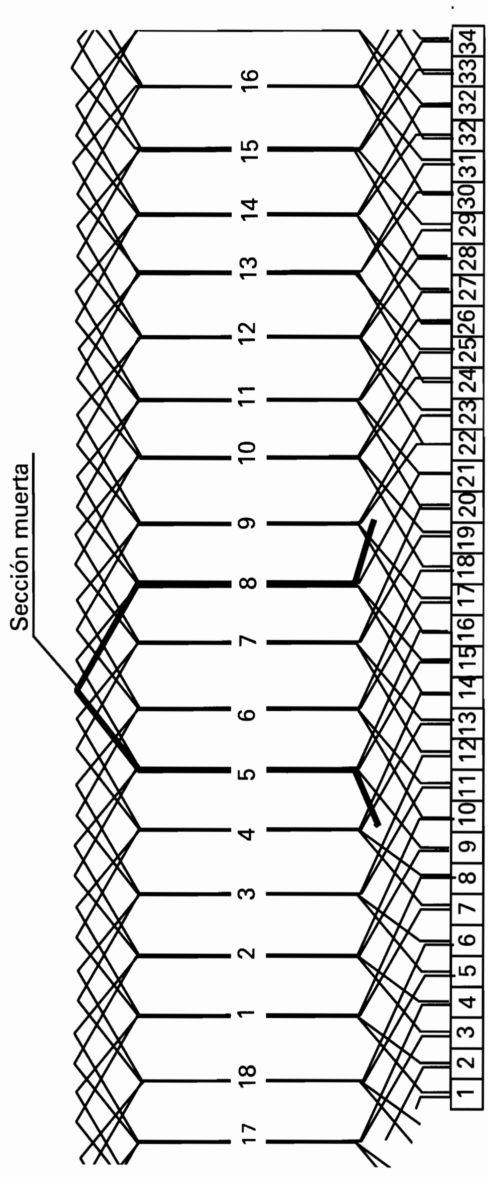
Yk = K / 2p = 4,166 ; Y col = Y1 + Y2 = 17 ; Y1 = Yk · U = 8 ; Y2 = Y col - Y1 = 9



Esquema c.c. 13.13. Devanado ondulado simple, para inducido, ejecutado sin cruzar y con paso acortado

K = 17 ; D = 34 ; 2p = 6 ; U = 2

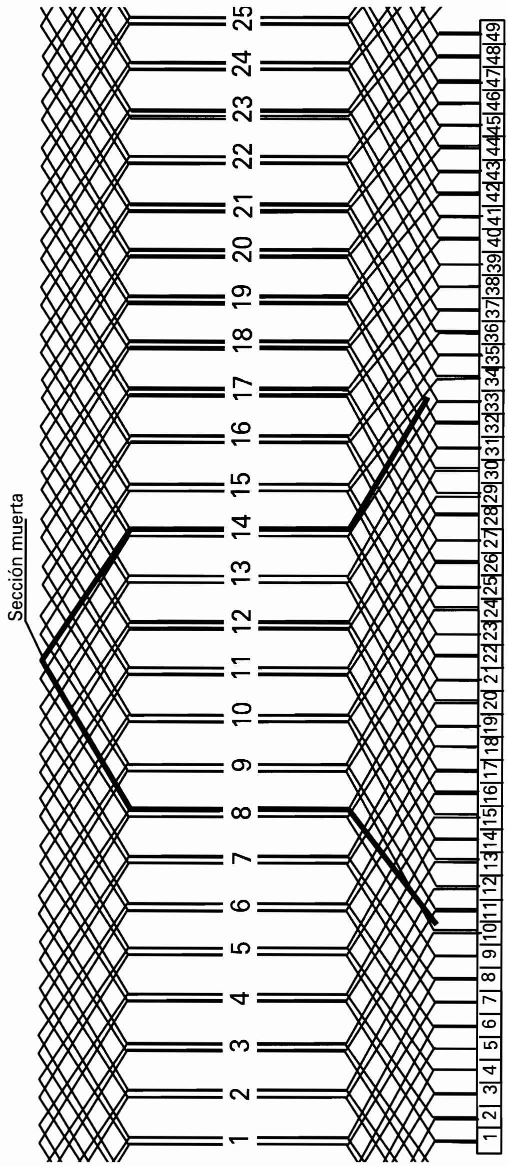
Yk = K / 2p = 2,8 ; Y col = Y1 + Y2 = 11; Y1 = Yk · U = 4 ; Y2 = Y col - Y 1 = 7



Esquema c.c. 13.14. Devanado ondulado simple, para inducido, ejecutado cruzado y con una sección muerta

K = 18 ; D = 35 ; 2p = 6 ; U = 2

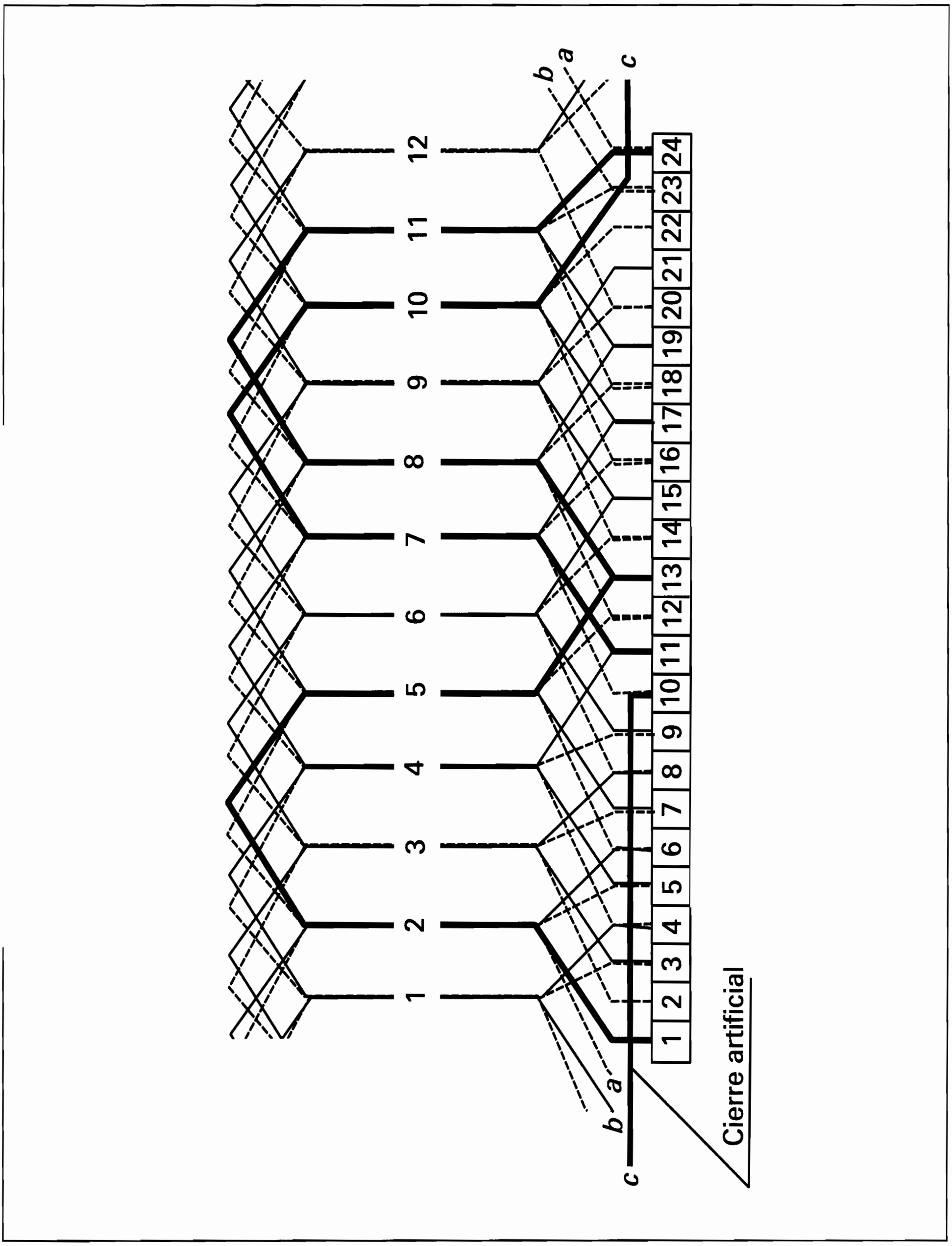
Yk = K / 2p = 3 ; Y col = Y1 + Y2 = 12 ; Y1 = Yk · U = 6 ; Y2 = Y col - Y1 = 6



Esquema c.c. 13.15. Devanado ondulado simple, ejecutado sin cruzar y con paso acortado

K = 25 ; D = 49 ; 2p = 4 ; U = 2

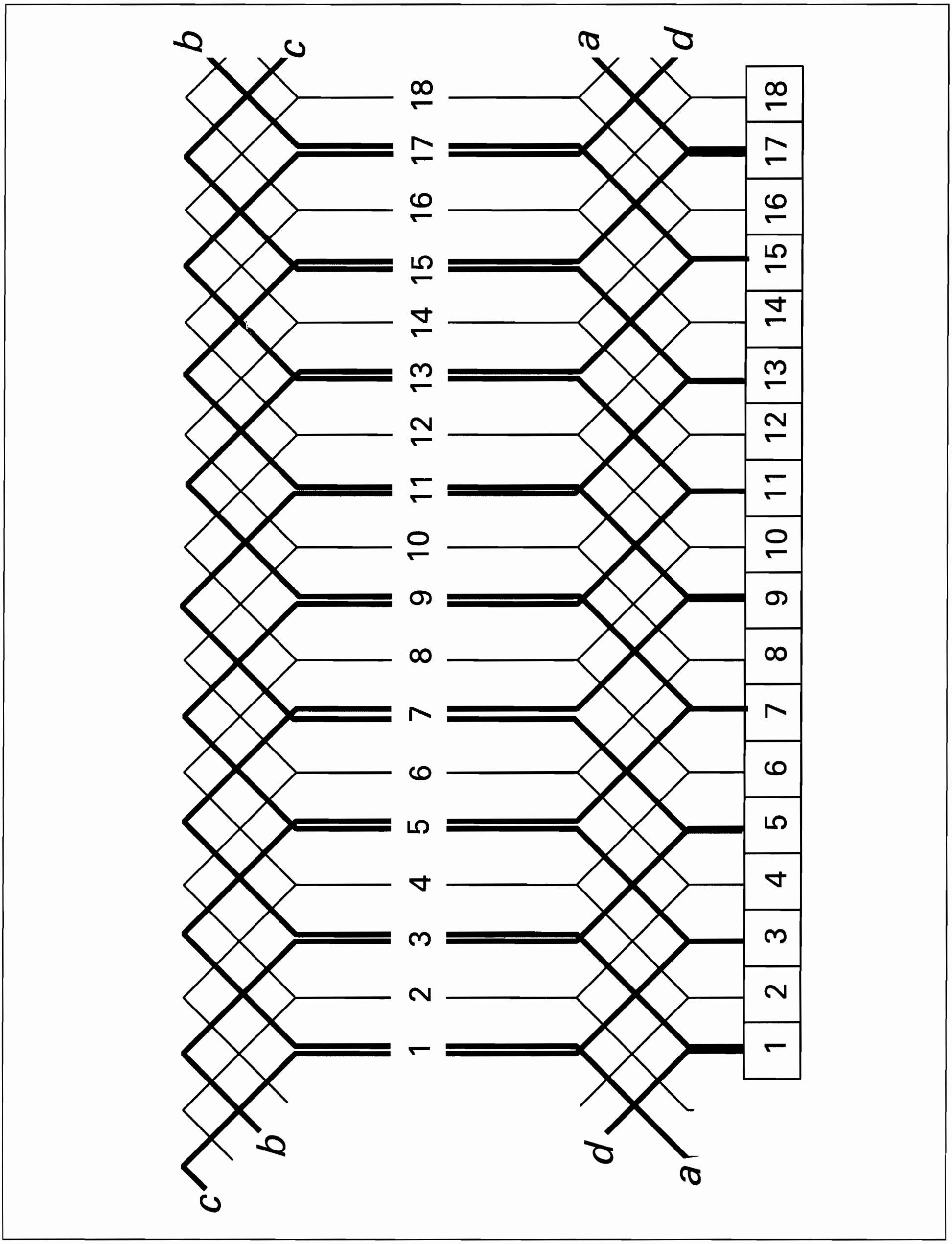
Yk = K / 2p = 6,25 ; Y col = Y1 + Y2 = 24 ; Y1 = Yk · U = 12 ; Y2 = Y col - Y1 = 12



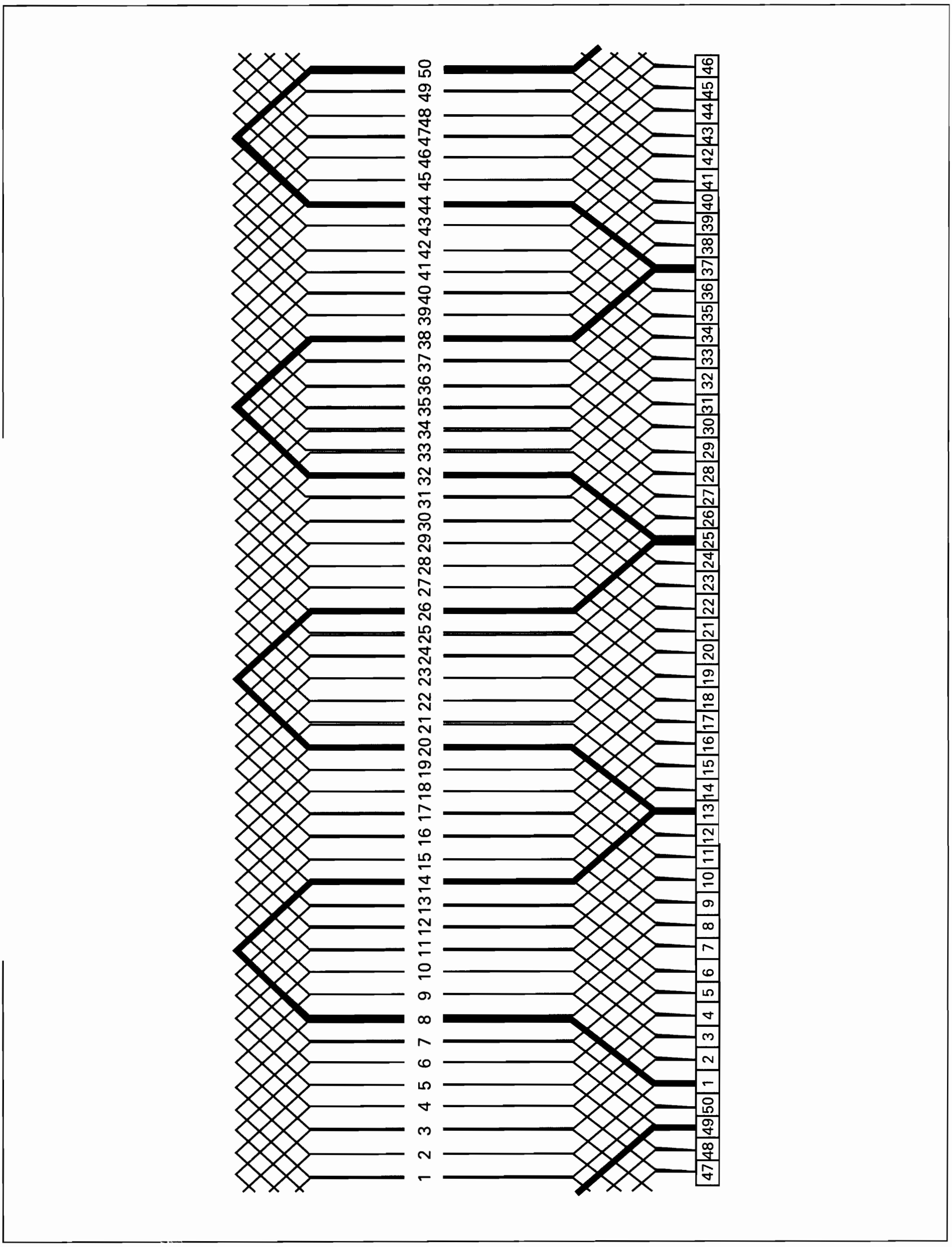
Esquema c.c. 13.16. Devanado ondulado simple, ejecutado con cierre artificial

K = 12 ; D = 24 ; 2p = 4 ; U = 2

Yk = K / 2p = 3 ; Y col = Y1 + Y2 = 11 ; Y1 = Yk · U = 6 ; Y2 = Y col - Y1 = 5



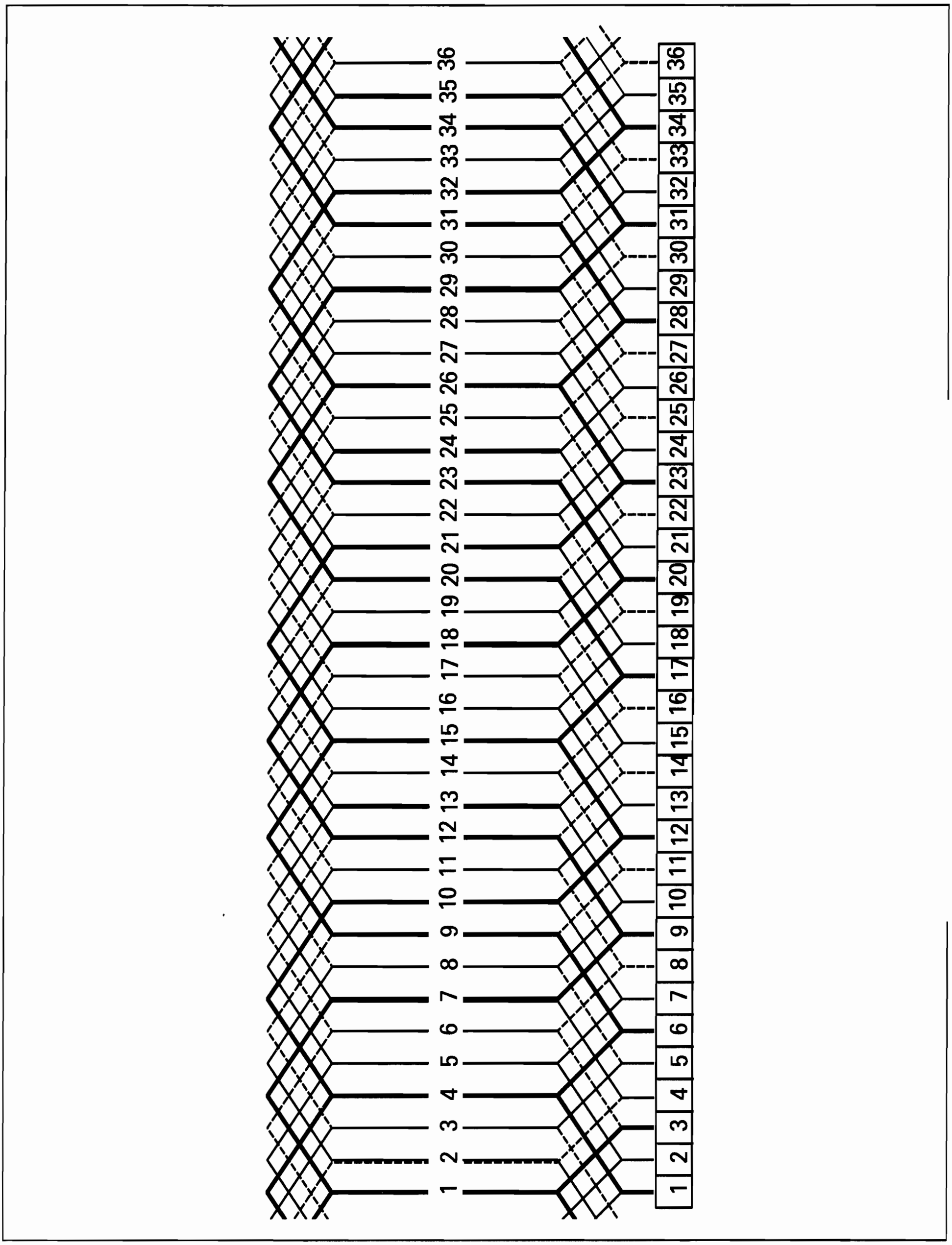
Esquema c.c. 13.17. Devanado ondulado doble, ejecutado sin cruzar y con paso acortado
K = 18 ; D = 18 ; 2p = 4 ; U = 1
Yk = K / 2p = 4,5 ; Y col = Y1 + Y2 = 8 ; Y1 = Yk · U = 4 ; Y2 = Y col – Y1 = 4



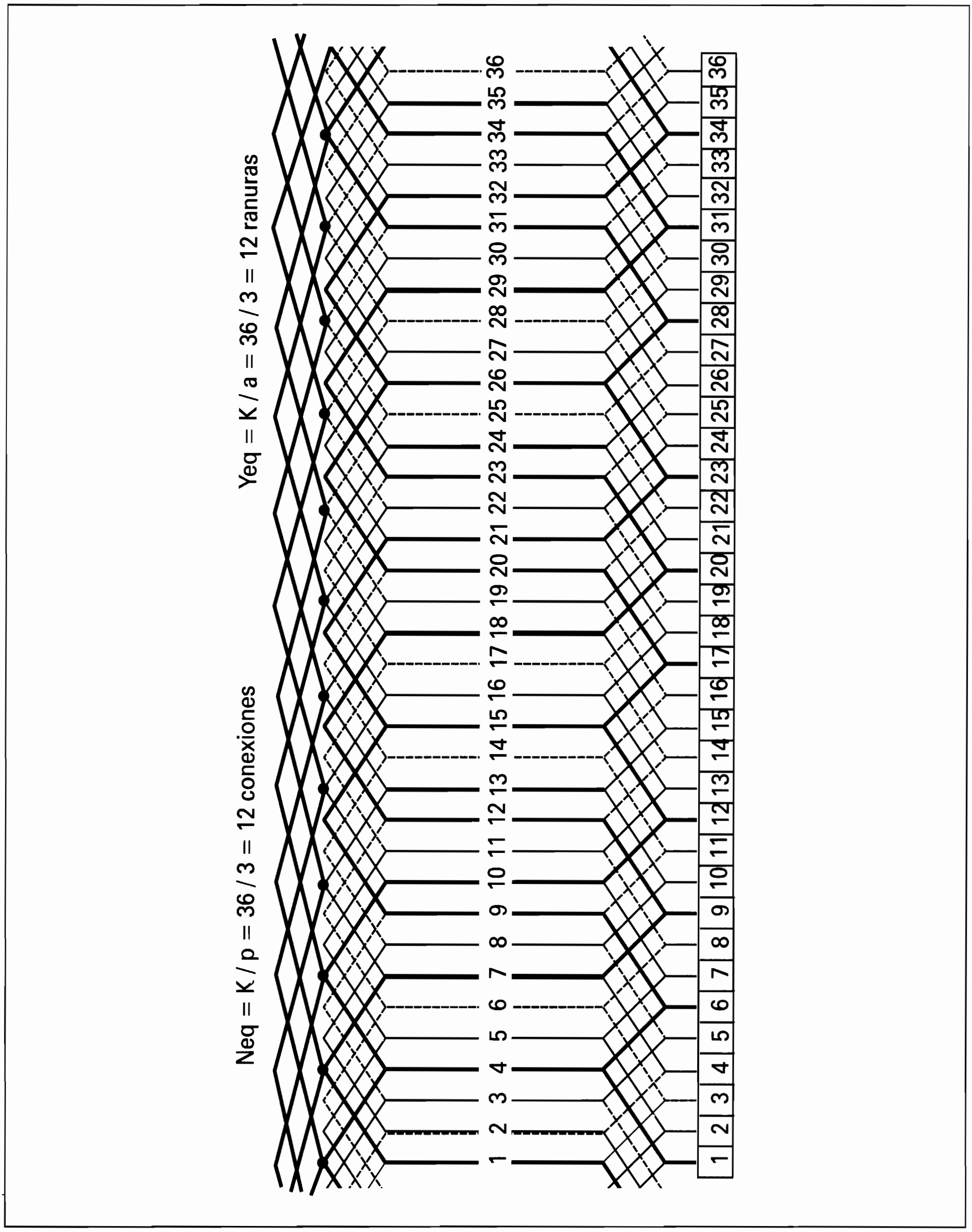
Esquema c.c. 13.18. Devanado ondulado doble, ejecutado sin cruzar y con paso acortado

$K = 50$; $D = 50$; $2p = 8$; $U = 1$

$Yk = K / 2p = 12$; $Y\ col = Y1 + Y2 = 12$; $Y1 = Yk \cdot U = 6$; $Y2 = Y\ col - Y1 = 6$



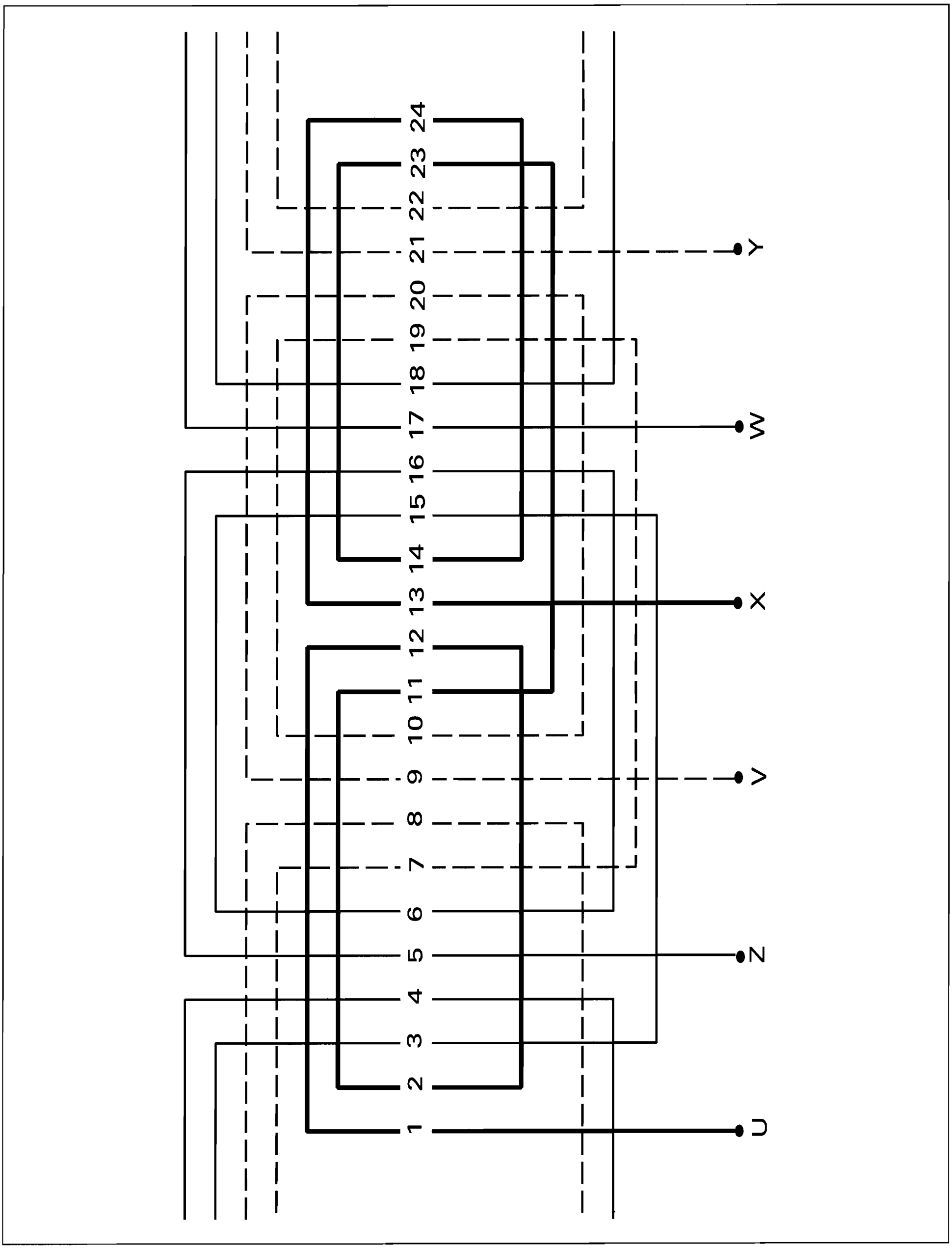
Esquema c.c. 13.19. Devanado ondulado triple, para inducido, ejecutado sin cruzar
K = 36 ; D = 36 ; 2p = 6 ; U = 1
Yk = K / 2p = 6 ; Y col = Y1 + Y2 = 11 ; Y1 = Yk · U = 6 ; Y2 = Y col - Y1 = 5



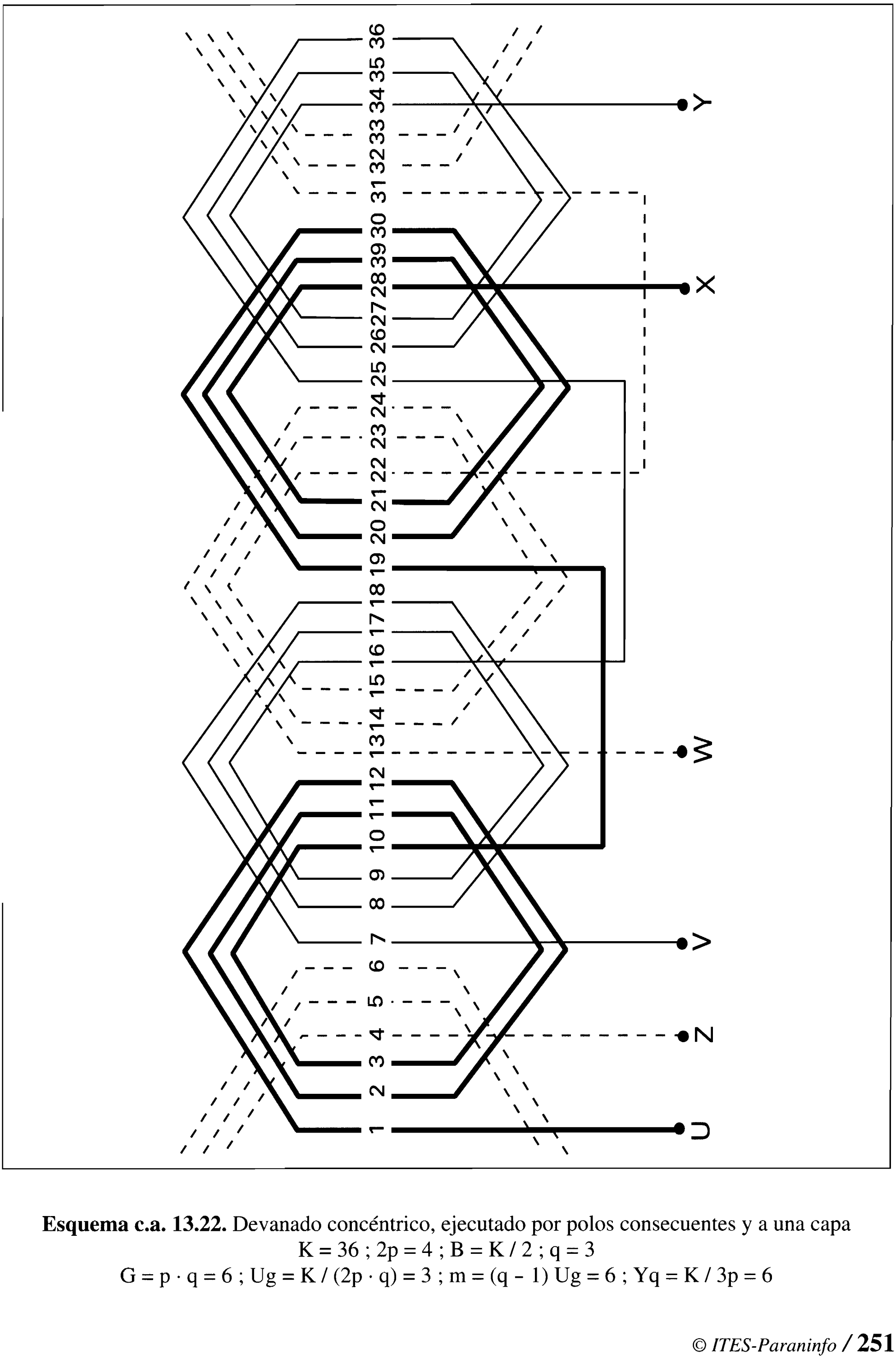
Esquema c.c. 13.20. Devanado ondulado triple, ejecutado sin cruzar y con bobinas equipotenciales de primera clase

K = 36 ; D = 36 ; 2p = 6 ; U = 1

Yk = K / 2p = 6 ; Y col = Y1 + Y2 = 11 ; Y1 = Yk · U = 6 ; Y2 = Y col - Y1 = 5



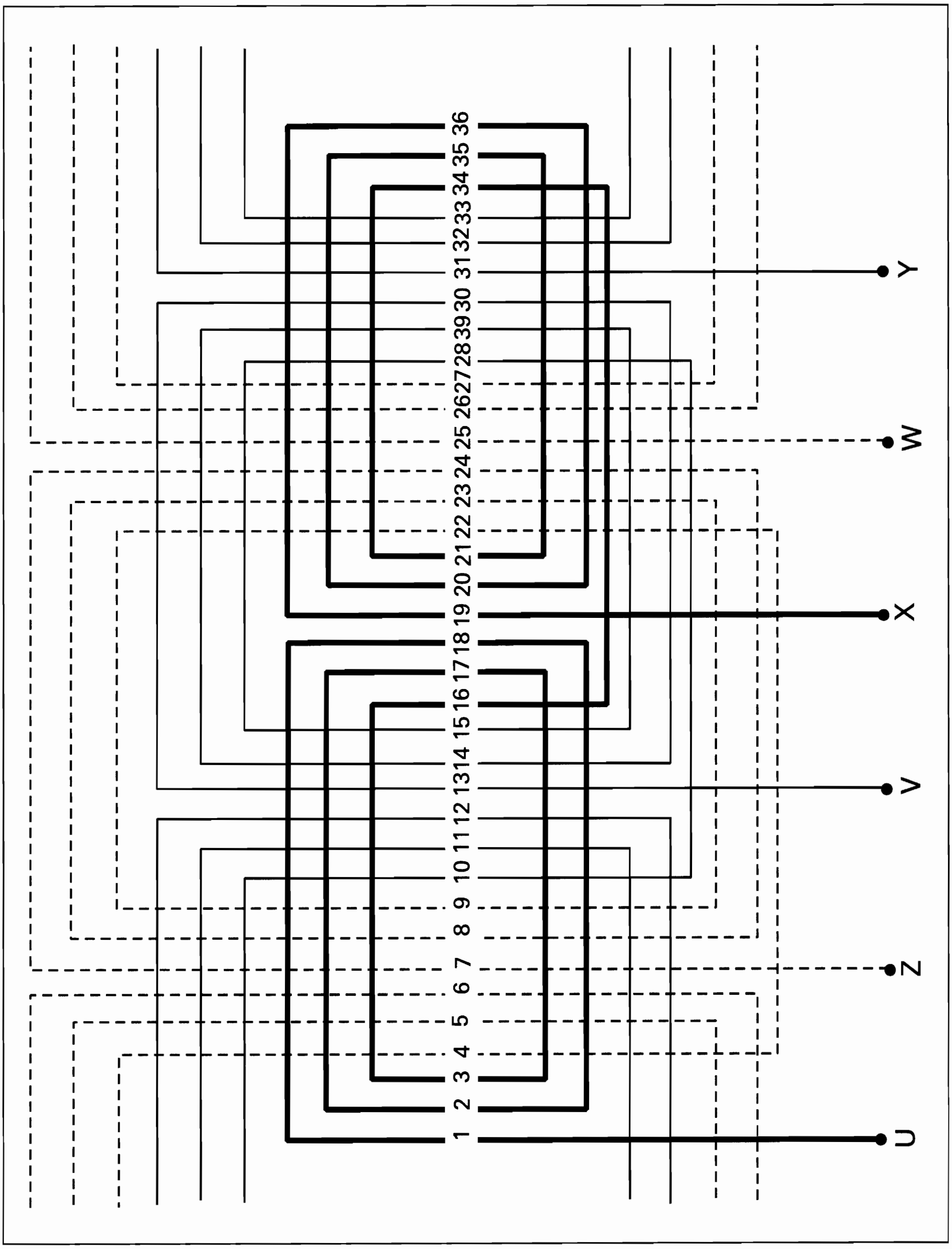
Esquema c.a. 13.21. Devanado concéntrico, ejecutado por polos y a una capa
$K = 24$; $2p = 2$; $B = K / 2$; $q = 3$
$G = 2p \cdot q = 6$; $Ug = K / (4p \cdot q) = 2$; $m = (q - 1)\, 2Ug = 8$; $Yq = K / 3p = 8$



Esquema c.a. 13.22. Devanado concéntrico, ejecutado por polos consecuentes y a una capa

$K = 36$; $2p = 4$; $B = K / 2$; $q = 3$

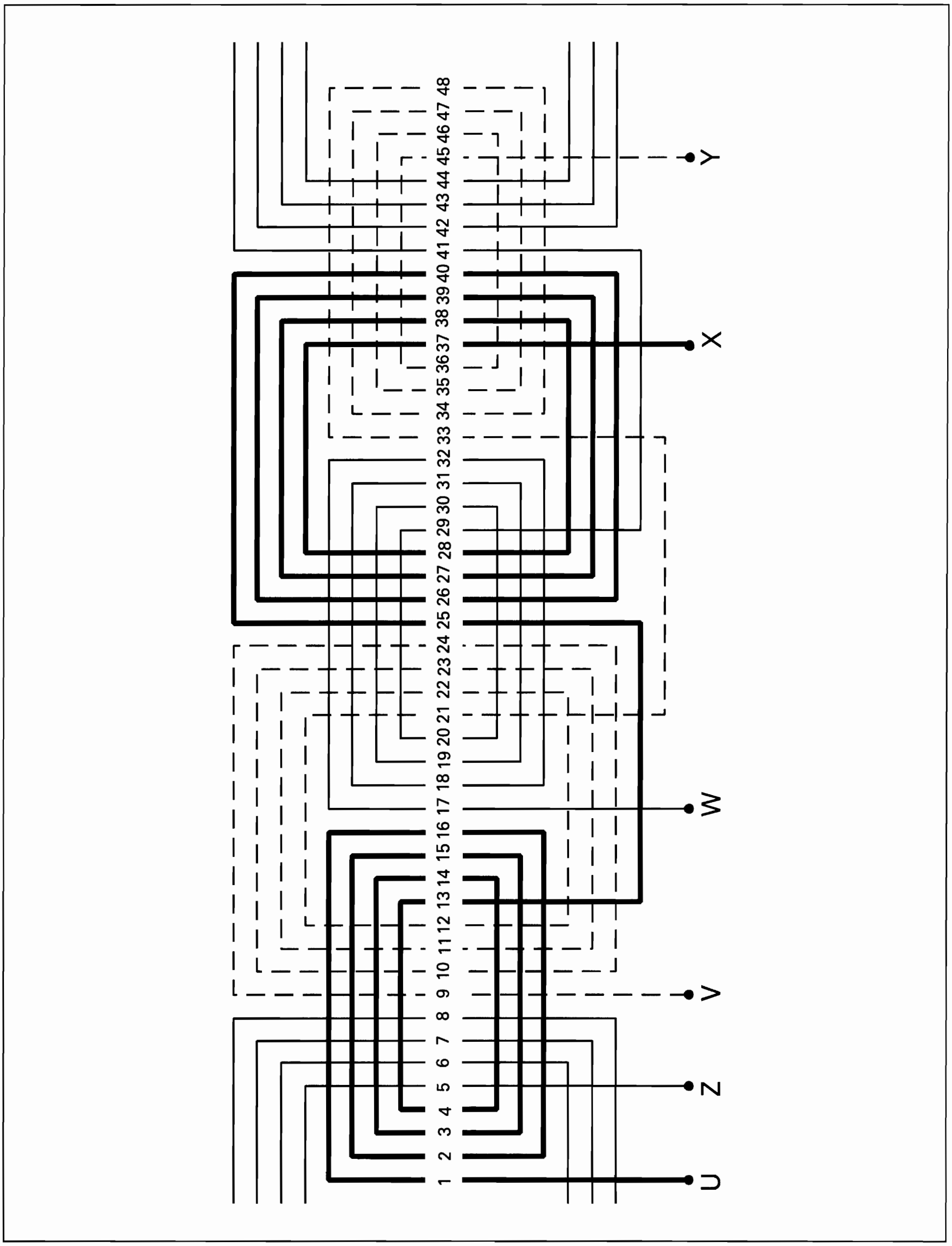
$G = p \cdot q = 6$; $Ug = K / (2p \cdot q) = 3$; $m = (q - 1)\ Ug = 6$; $Yq = K / 3p = 6$



Esquema c.a. 13.23. Devanado concéntrico, ejecutado por polos y a una capa

K = 36 ; 2p = 2 ; B = K / 2 ; q = 3

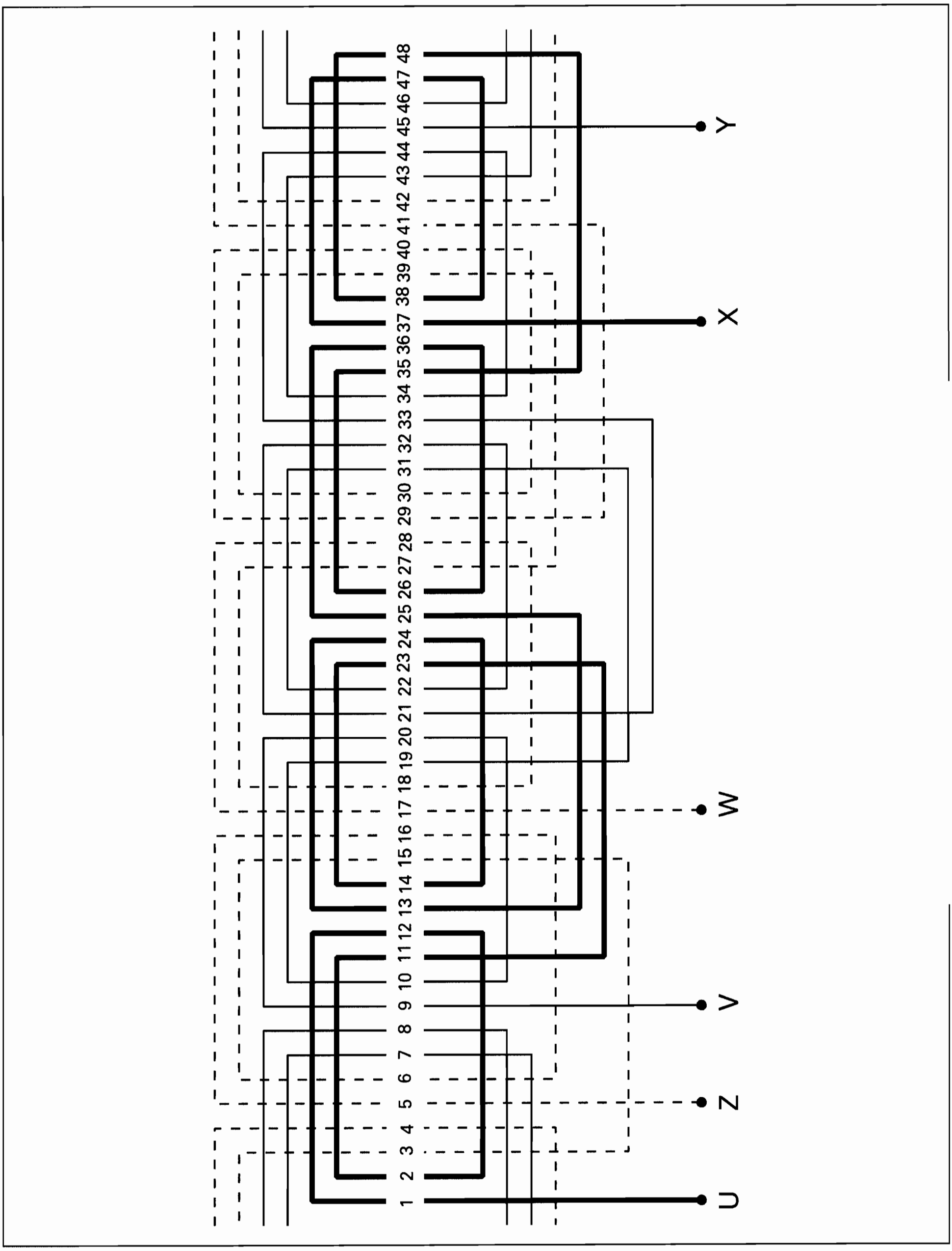
G = 2p · q = 6 ; Ug = K / (4p · q) = 3 ; m = (q – 1) 2Ug = 12 ; Yq = K / 3p = 12



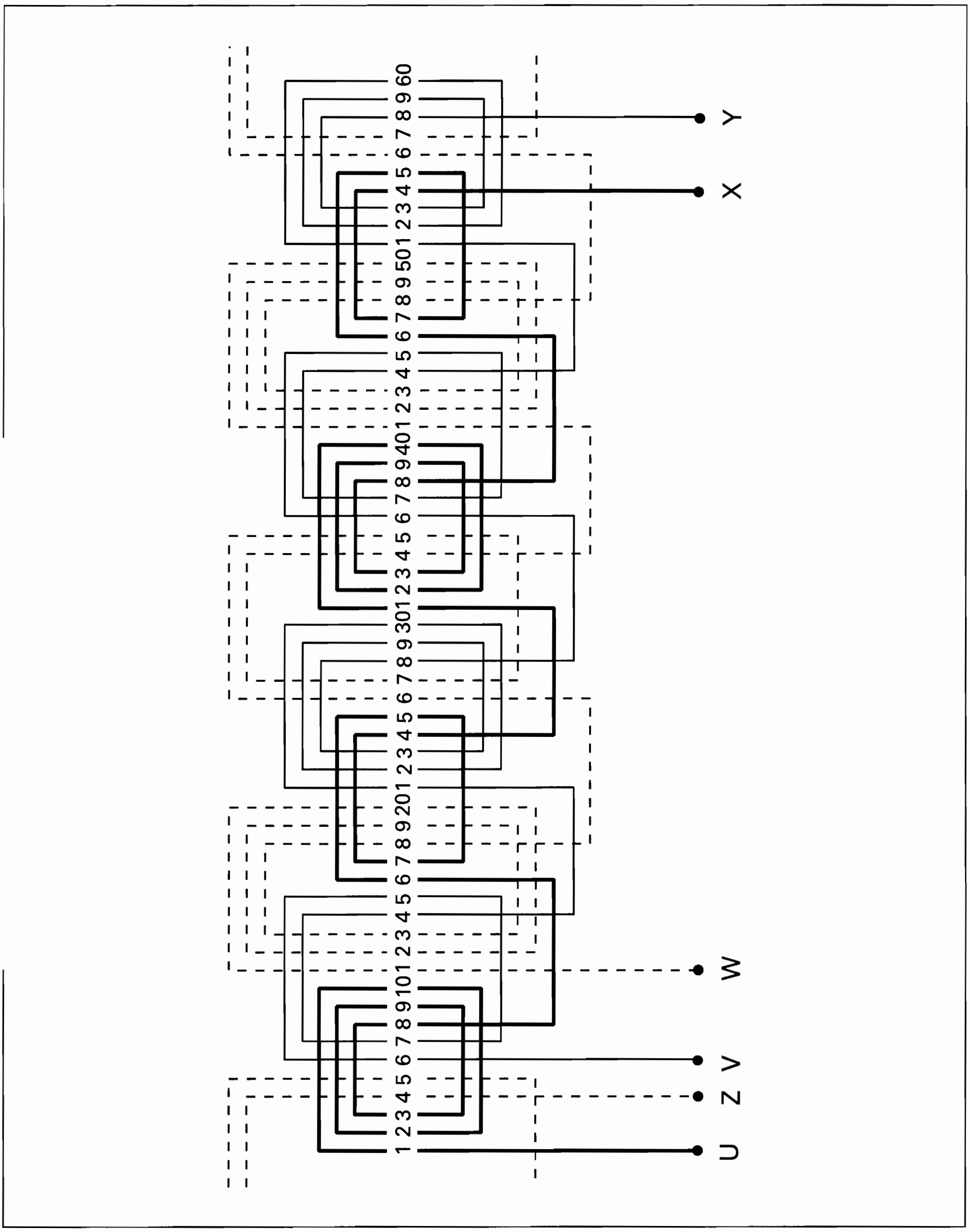
Esquema c.a. 13.24. Devanado concéntrico, ejecutado por polos consecuentes y a una capa

K = 48 ; 2p = 4 ; B = K / 2 ; q = 3

G = p · q = 6 ; Ug = K / (2p · q) = 4 ; m = (q - 1) Ug = 8 ; Yq = K / 3p = 8



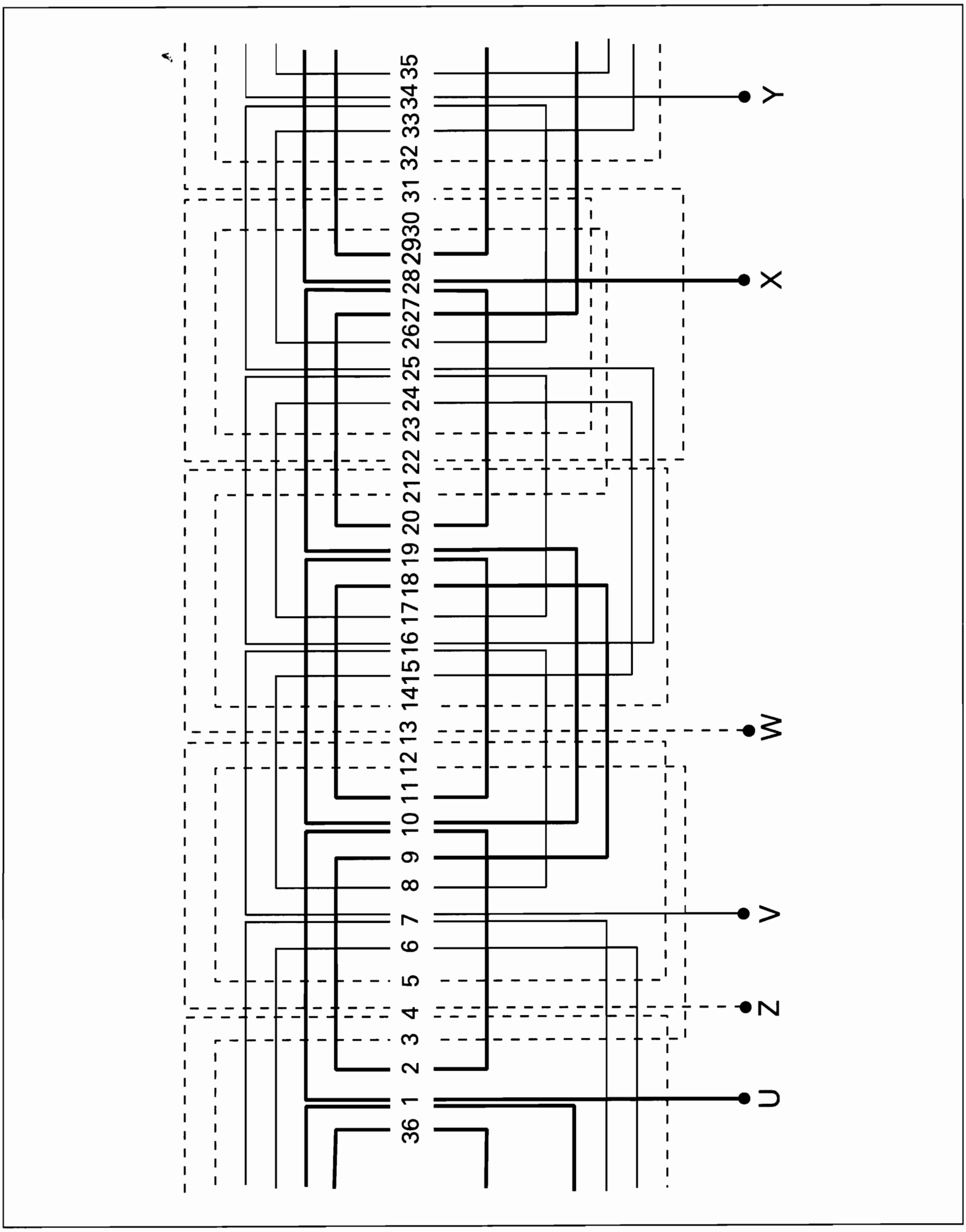
Esquema c.a. 13.25. Devanado concéntrico, ejecutado por polos y a una capa
K = 48 ; 2p = 4 ; B = K/ 2 ; q = 3
G = 2p · q = 12 ; Ug = K / (4p · q) = 2 ; m = (q – 1) 2Ug = 8 ; Yq = K / 3p = 8



Esquema c.a. 13.26. Devanado concéntrico mixto (grupos de dos y tres bobinas), ejecutado por polos consecuentes y a una capa

K = 60 ; 2p = 8 ; B = K/ 2 ; q = 3

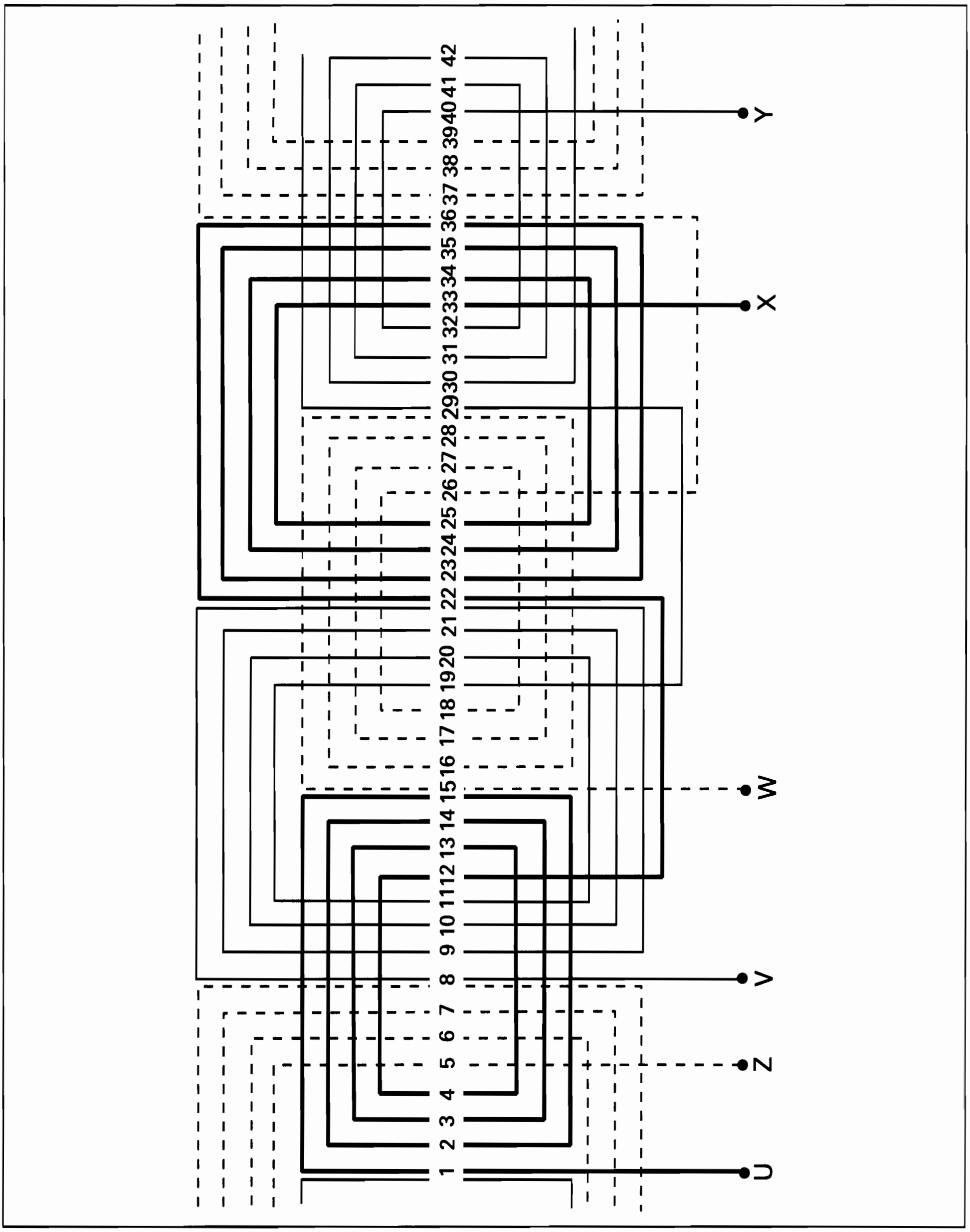
G = p · q = 12 ; Ug = K / (2p · q) = 2,5 ; m = (q – 1) Ug = 4 y 6 ; Yq = K / 3p = 5



Esquema c.a. 13.27. Devanado concéntrico mixto (grupos con medias bobinas), ejecutado por polos y a una capa

K = 36 ; 2p = 4 ; B = K/ 2 ; q = 3

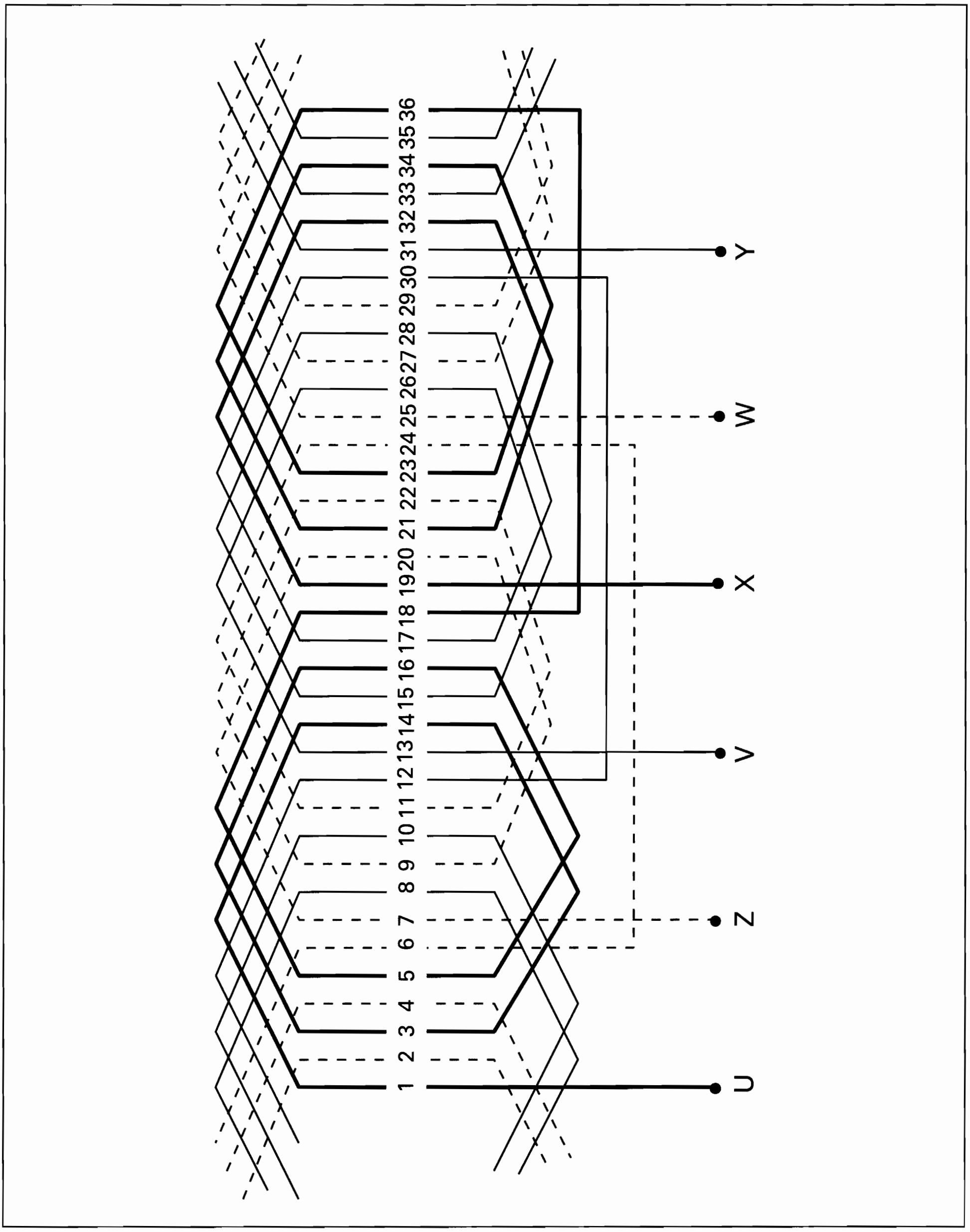
G = 2p · q = 12 ; Ug = K / (4p · q) = 1,5 ; m = (q – 1) 2Ug = 6 ; Yq = K / 3p = 6



Esquema c.a. 13.28. Devanado concéntrico mixto (grupos con medias bobinas), ejecutado por polos consecuentes y a una capa

$K = 42$; $2p = 4$; $B = K/2$; $q = 3$

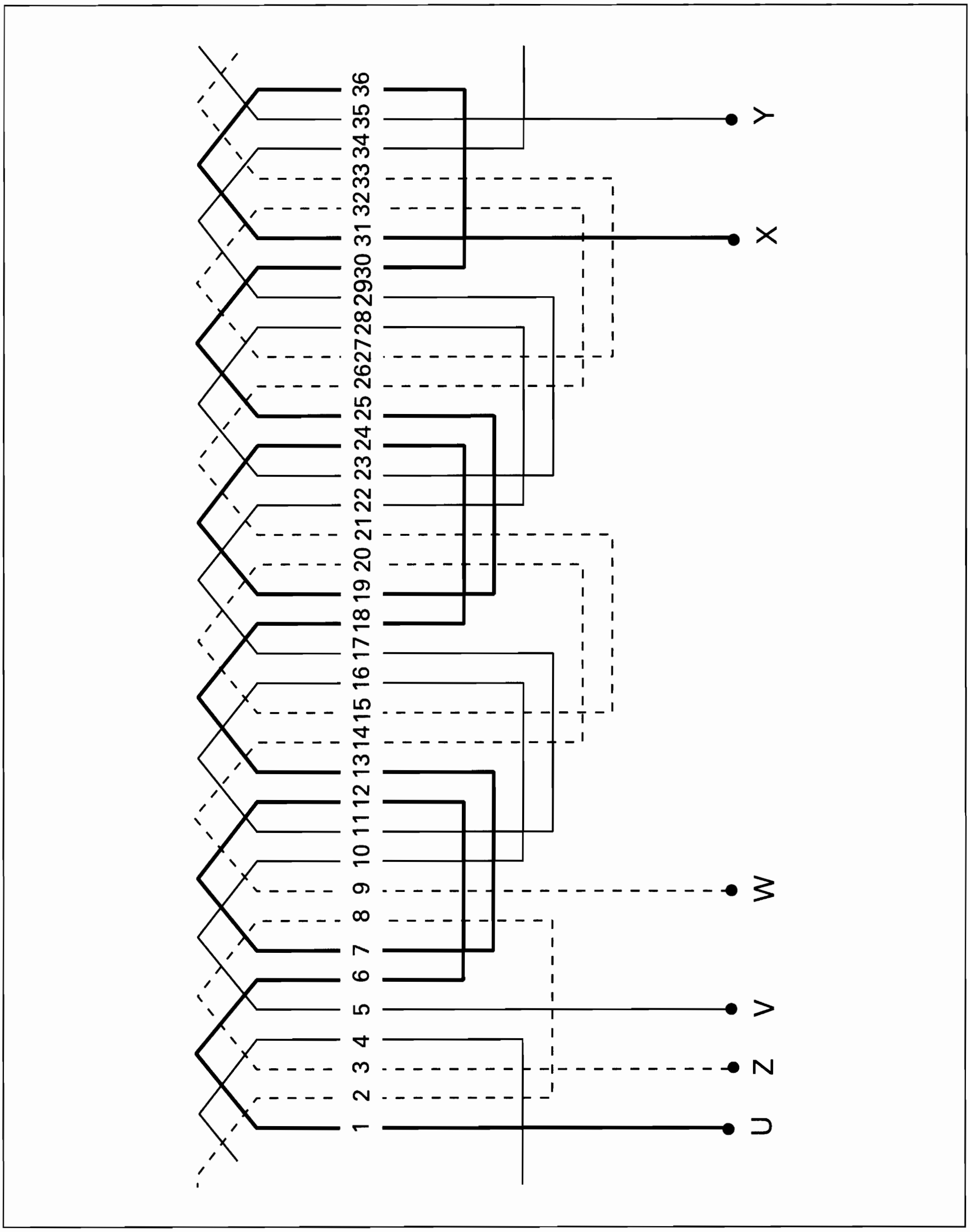
$G = p \cdot q = 6$; $Ug = K / (2p \cdot q) = 3{,}5$; $m = (q - 1)\, Ug = 7$; $Yq = K / 3p = 7$



Esquema c.a. 13.29. Devanado imbricado entero, ejecutado con paso muy acortado, por polos y a una capa

K = 36 ; 2p = 2 ; B = K/ 2 ; q = 3

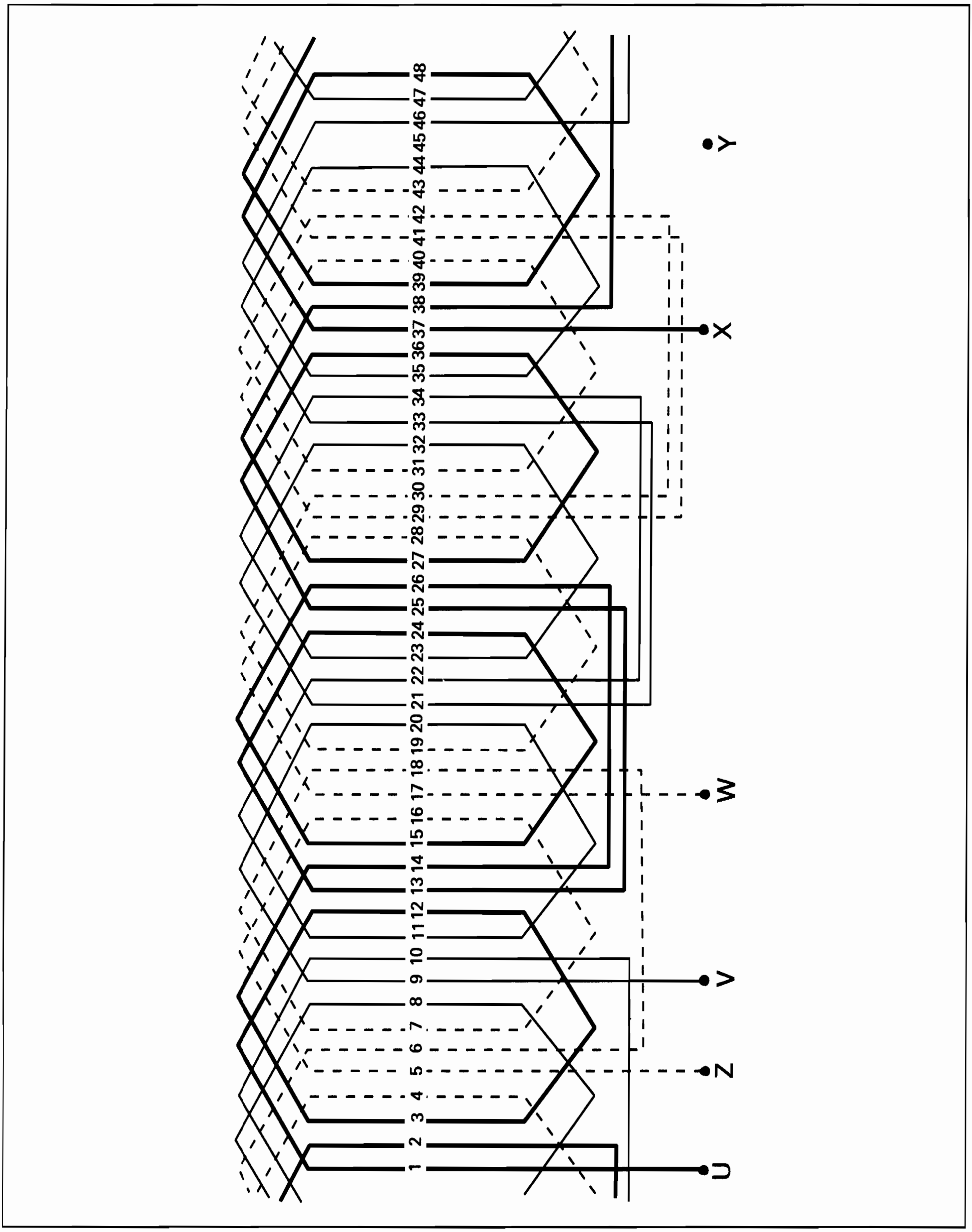
G =2p · q = 6 ; Ug = K / (4p · q) = 3 ; Yk = K / 2p = 18 ; Yq = K / 3p = 12



Esquema c.a. 13.30. Devanado imbricado entero, ejecutado con paso acortado, por polos y a una capa

K = 36 ; 2p = 6 ; B = K/ 2 ; q = 3

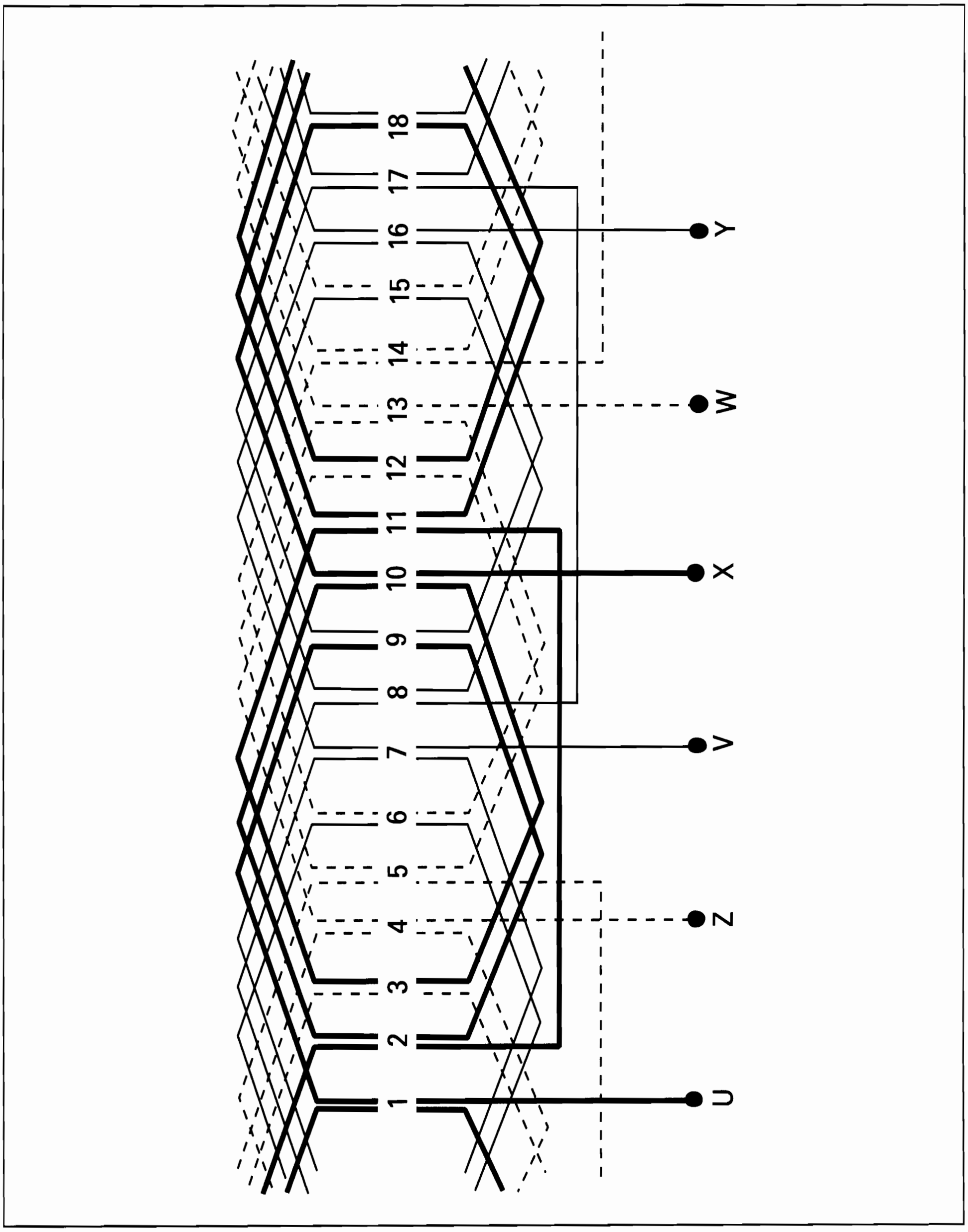
G =2p · q =18 ; Ug = K / (4p · q) = 1 ; Yk = K / 2p = 6 ; Yq = K / 3p = 4



Esquema c.a. 13.31. Devanado imbricado entero, ejecutado con paso acortado, por polos y a una capa

K = 48 ; 2p = 4 ; B = K/ 2 ; q = 3

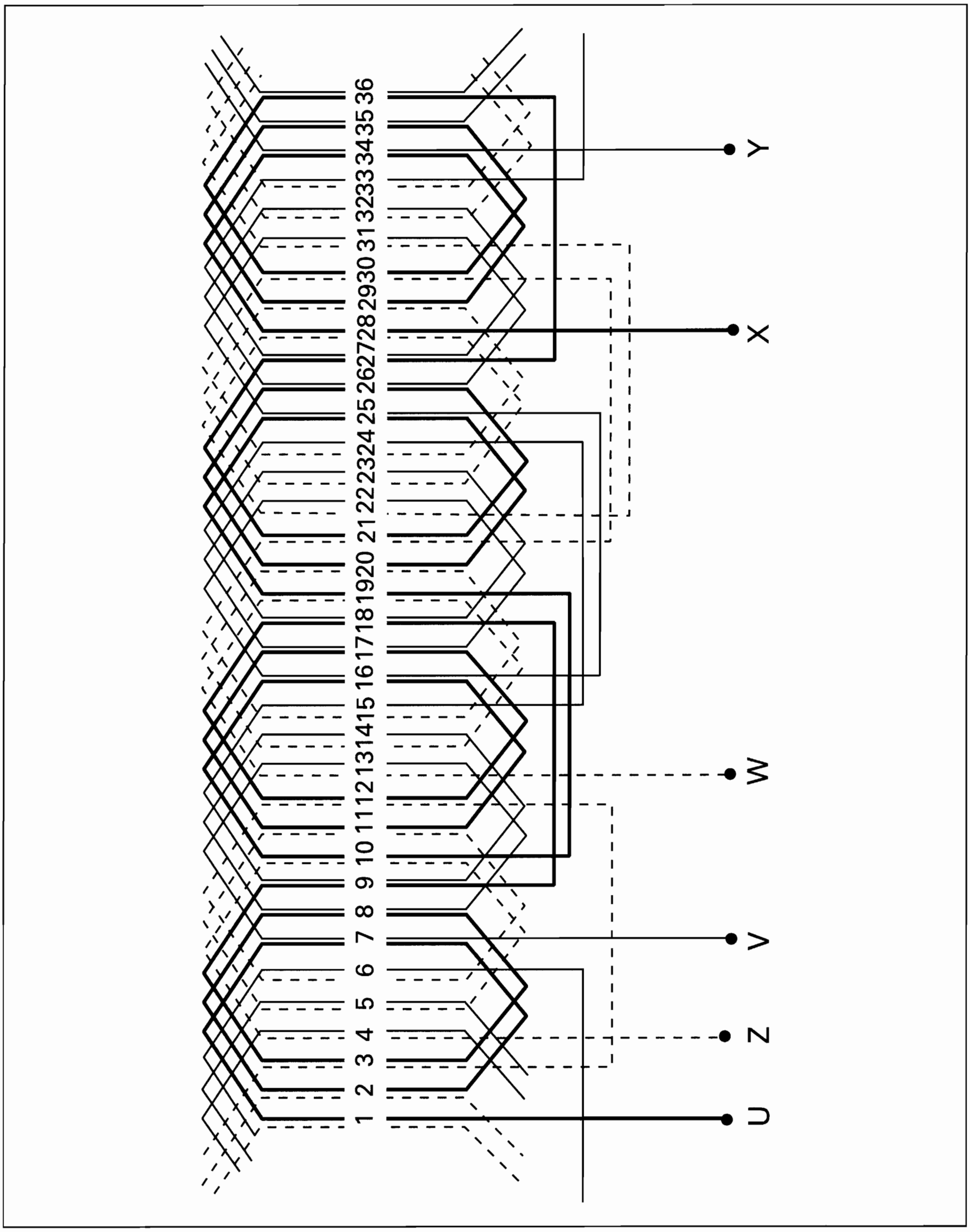
G =2p · q =12 ; Ug = K / (4p · q) = 2 ; Yk = K / 2p = 12 ; Yq = K / 3p = 8



Esquema c.a. 13.32. Devanado imbricado entero, ejecutado con paso acortado, por polos y a doble capa

K = 18 ; 2p = 2 ; B = K ; q = 3

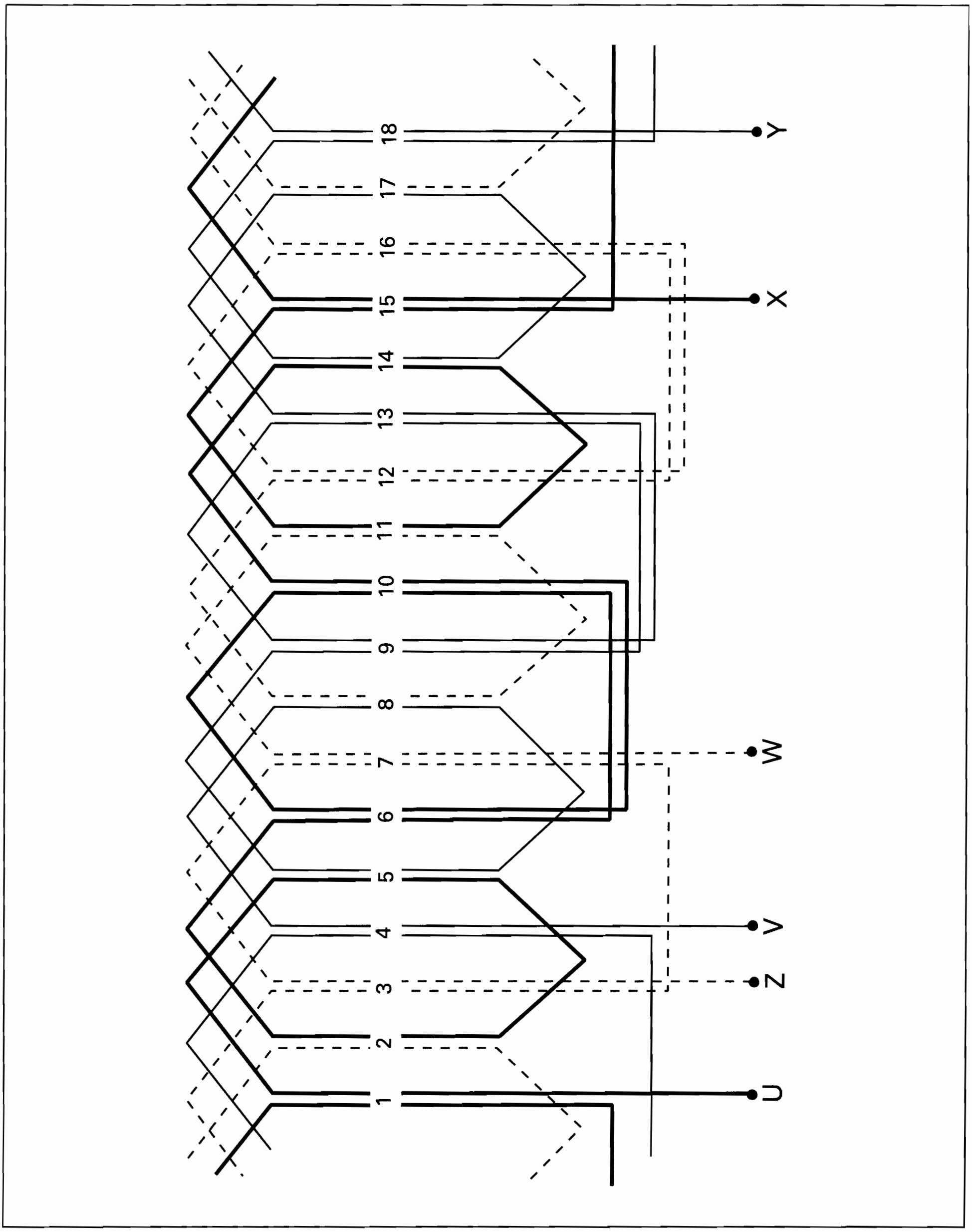
G =2p · q = 6 ; Ug = K / (2p · q) = 3 ; Yk = K / 2p = 9 ; Yq = K / 3p = 6



Esquema c.a. 13.33. Devanado imbricado entero, ejecutado con paso muy acortado, por polos y a doble capa

K = 36 ; 2p = 4 ; B = K ; q = 3

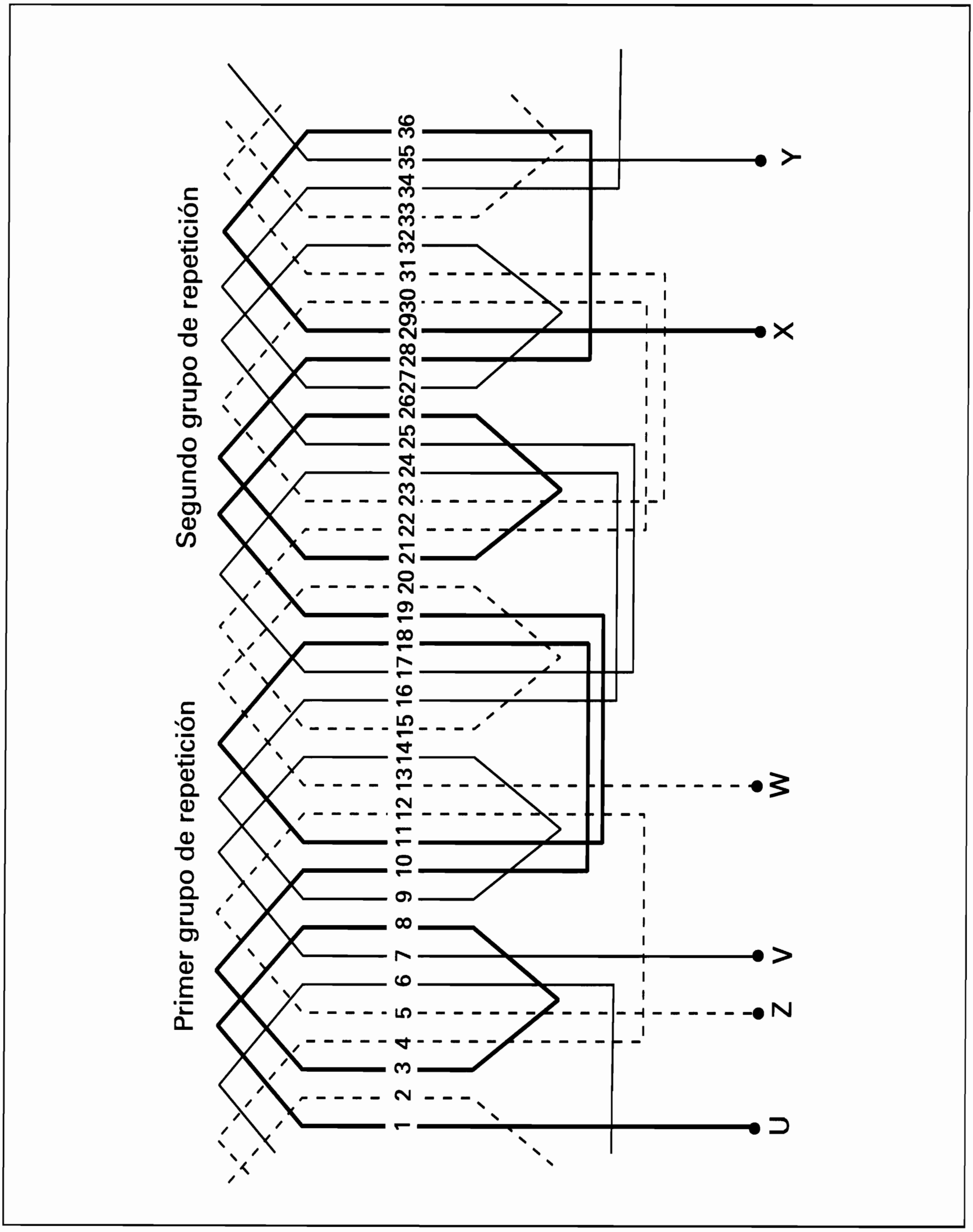
G = 2p · q = 12 ; Ug = K / 2p · q = 3 ; Yk = K / 2p = 9 ; Yq = K / 3p = 6



Esquema c.a. 13.34. Devanado imbricado fraccionario, ejecutado con paso acortado, por polos y a doble capa

K = 18 ; 2p = 4 ; B = K ; q = 3

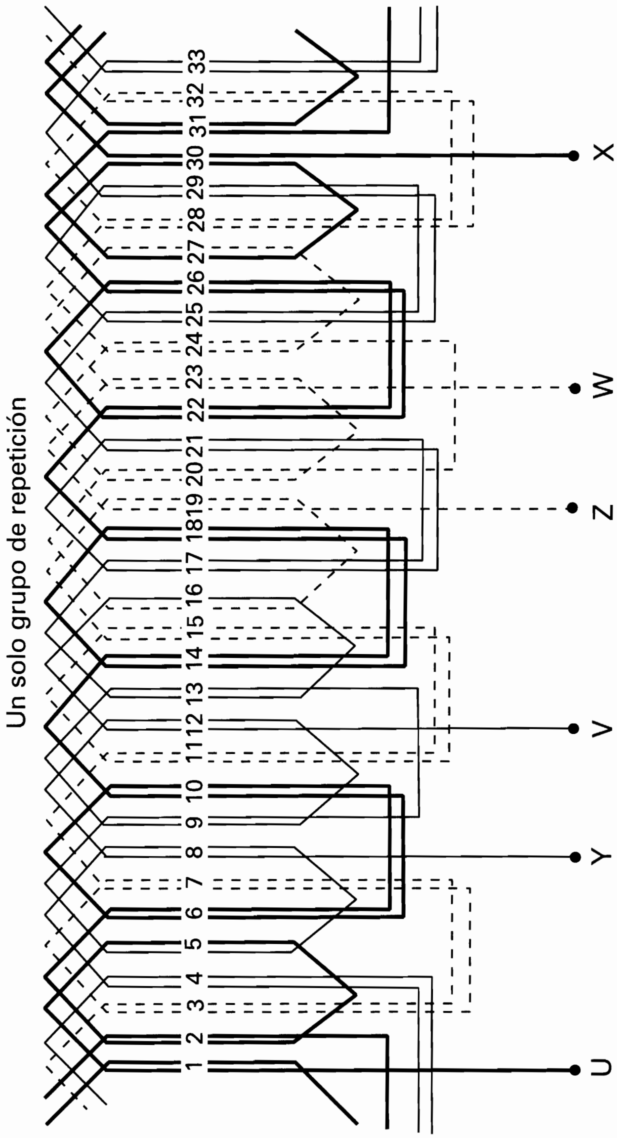
G = 2p · q = 12 ; Ug = B / 2p · q = 1½ ; Yk = K / 2p = 4,5 ; Yq = K / 3p = 3



Esquema c.a. 13.35. Devanado imbricado fraccionario, ejecutado con paso acortado, por polos y a una capa

K = 36 ; 2p = 4 ; B = K / 2 ; q = 3

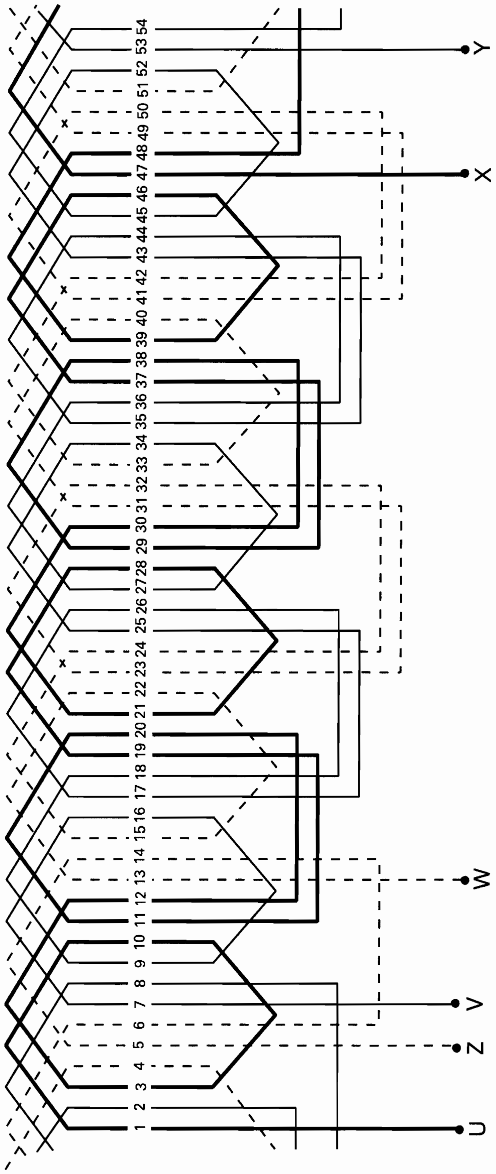
G = 2p · q = 12 ; Ug = B / 2p · q = 1½ ; Yk = K / 2p = 9 ; Yq = K / 3p = 6



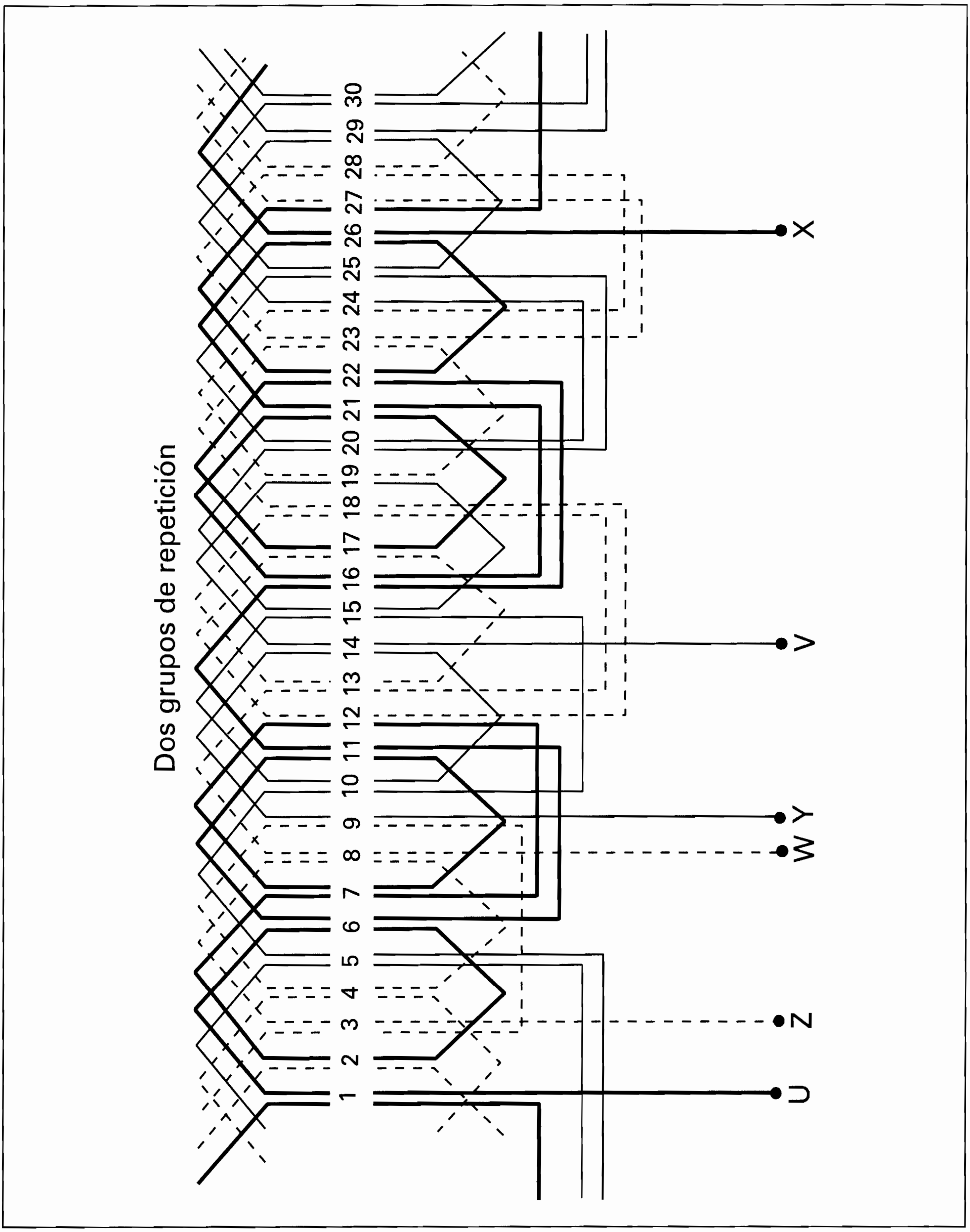
Esquema c.a. 13.36. Devanado imbricado fraccionario, ejecutado con paso acortado, por polos y a doble capa

$K = 33$; $2p = 8$; $B = K$; $q = 3$

$G = 2p \cdot q = 24$; $Ug = B / 2p \cdot q = 1\frac{3}{8}$; $Yk = K / 2p = 4{,}125$; $Yq = K / 3p = 2{,}75$



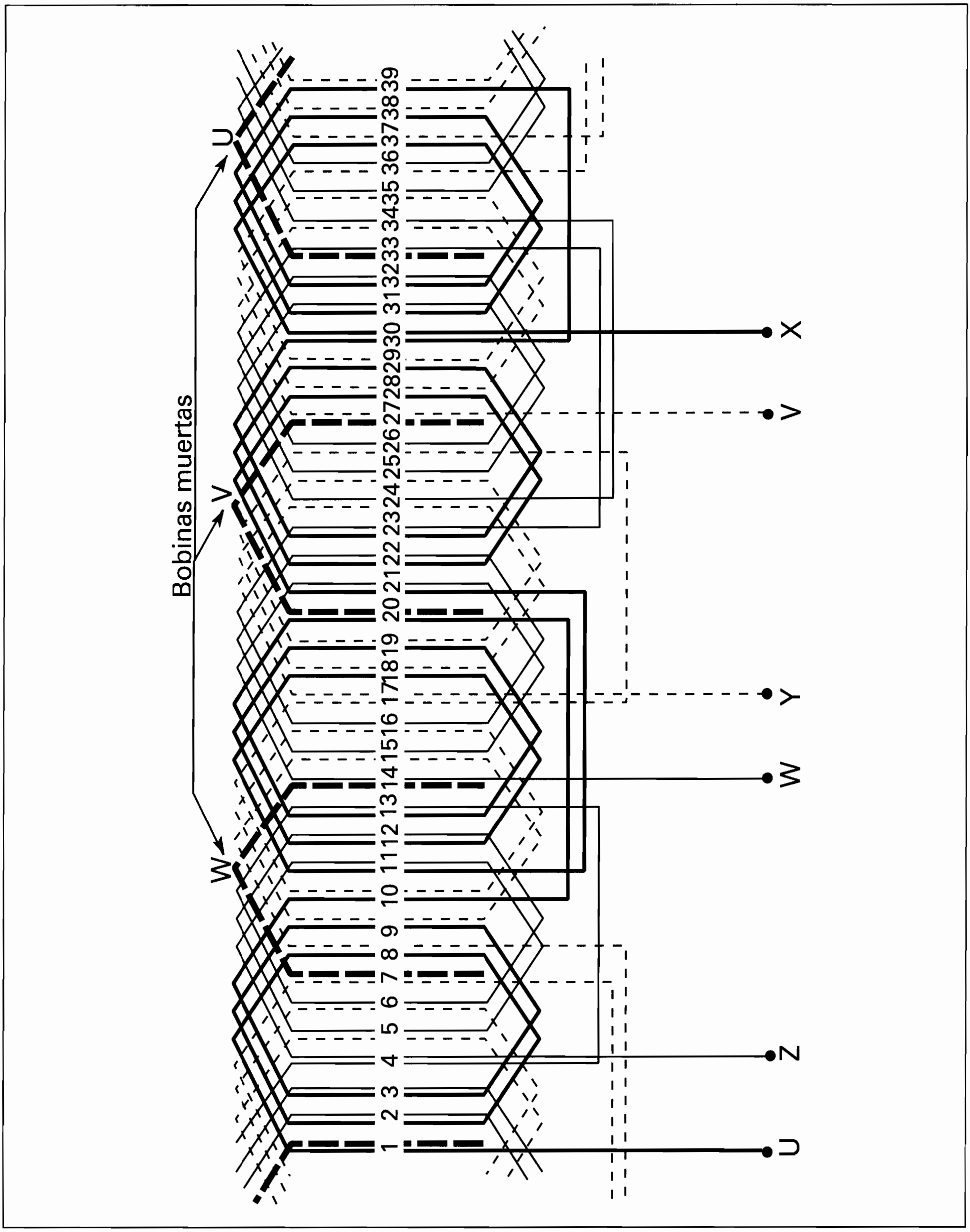
Esquema c.c. 13.37. Devanado imbricado fraccionario, ejecutado por polos y a una capa
K = 54 ; 2p = 6 ; B = K / 2 ; q = 3
G = 2p · q ; Ug = B / (2p · q) = 1 ½ ; Yk = K / 2p = 9 ; Yq = K / 3p = 6



Esquema c.a. 13.38. Devanado imbricado fraccionario, irregular, ejecutado por polos y a doble capa

$K = 30 ; 2p = 6 ; B = K ; q = 3$

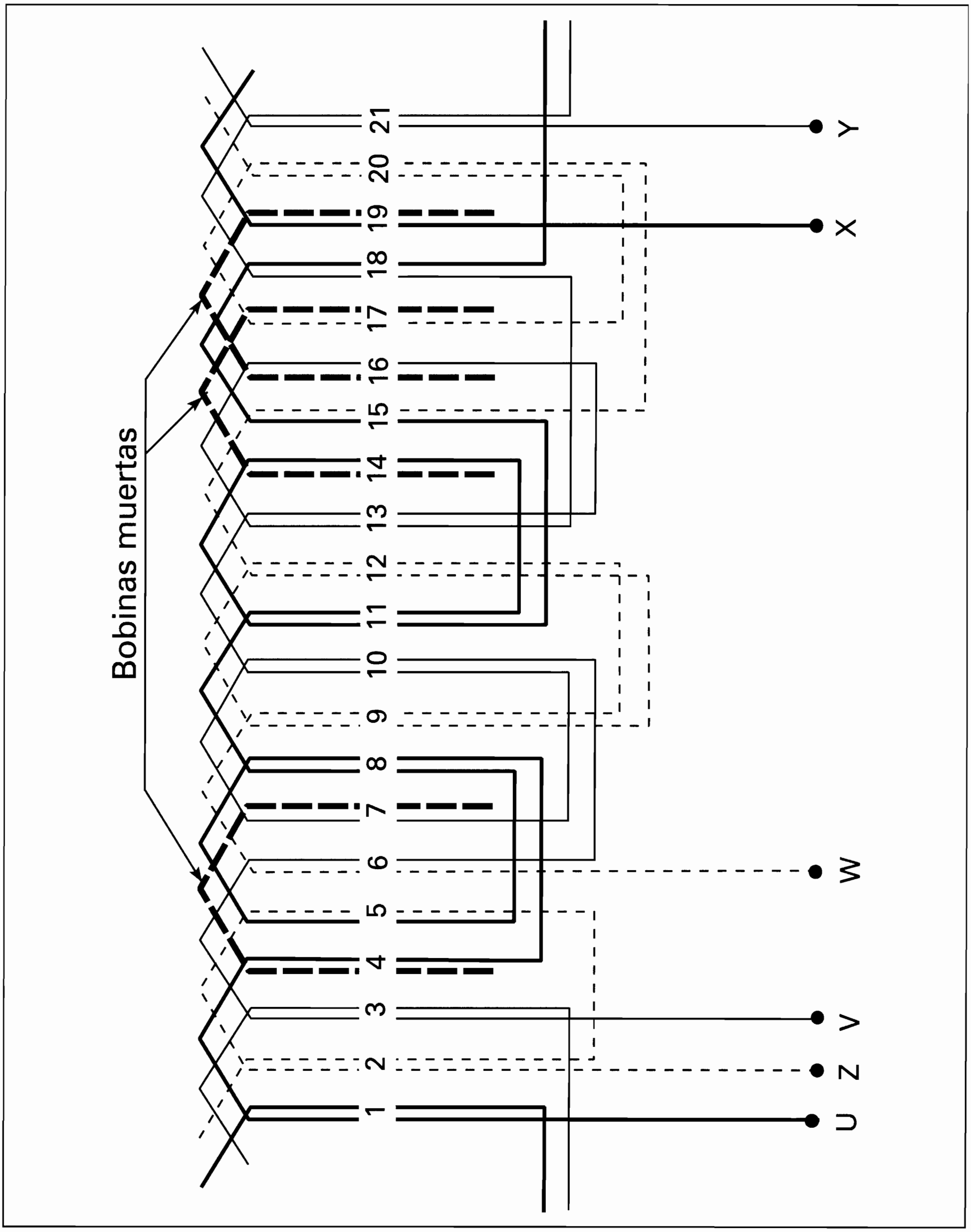
$G = 2p \cdot q = 18 ; Ug = B / (2p \cdot q) = 1^2\!/_3 ; Yk = K / 2p = 5 : Yq = K / 3p = 3{,}333$



Esquema c.a. 13.39. Devanado imbricado fraccionario, con tres bobinas muertas, ejecutado por polos y a doble capa

K = 39 ; 2p = 4 ; B = K ; q = 3

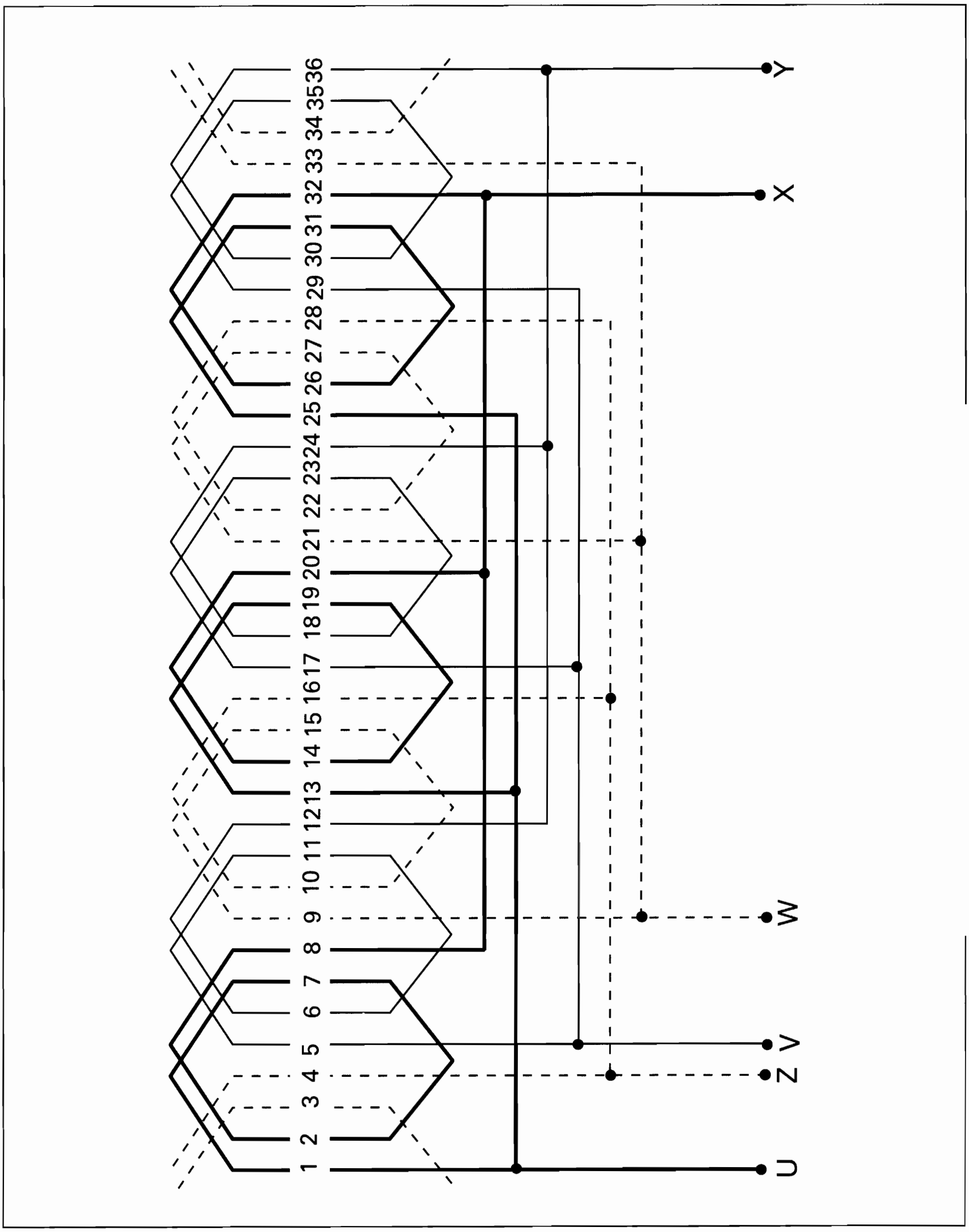
G = 2p · q = 12 ; Ug = B / (2p · q) = 3¼ ; Yk = K / 2p = 9,75 : Yq = K / 3p = 6,5



Esquema c.a. 13.40. Devanado imbricado fraccionario, con tres bobinas muertas, ejecutado por polos y a doble capa

K = 21 ; 2p = 6 ; B = K ; q = 3

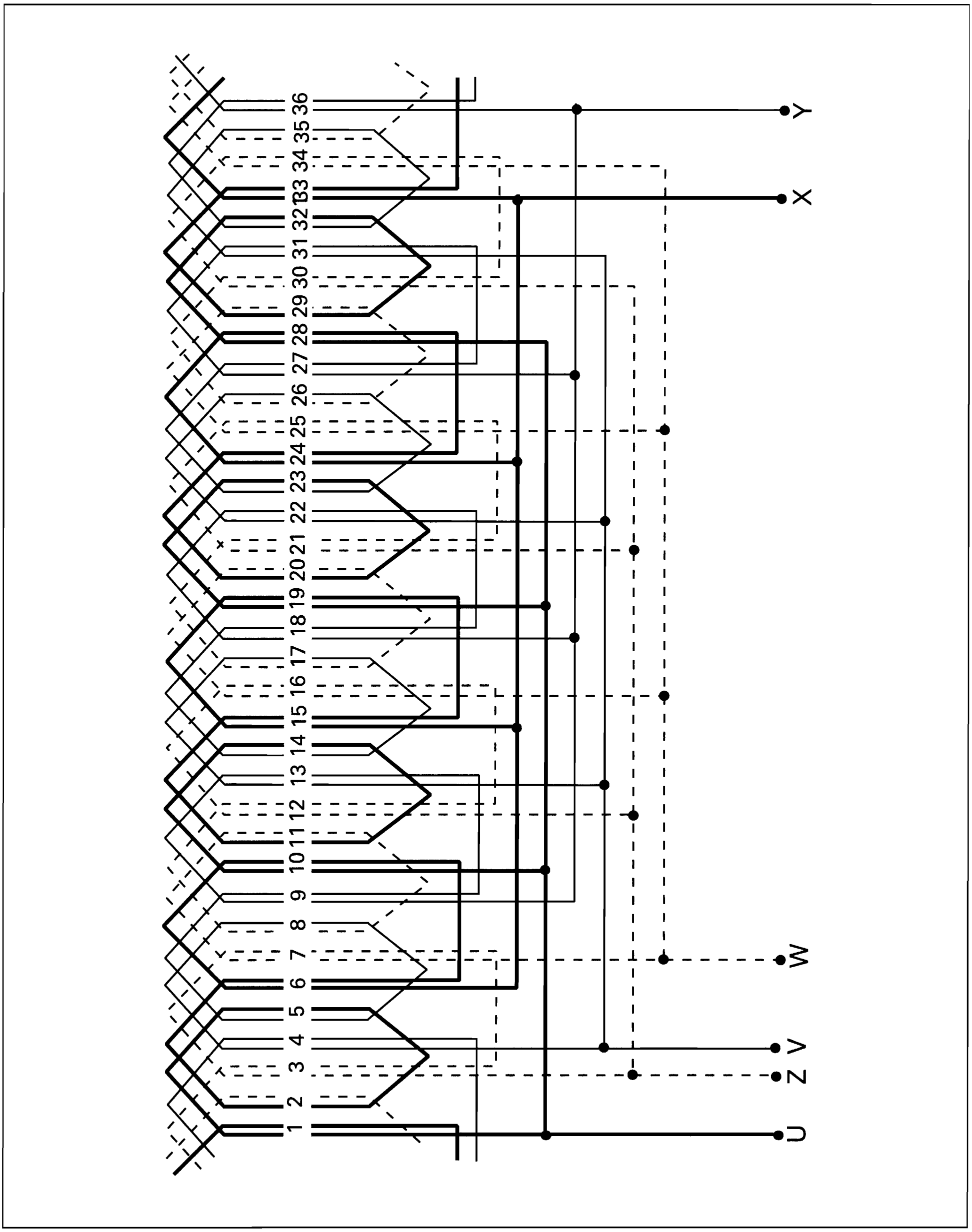
G = 2p · q = 18 ; Ug = B / (2p · q) = 1,166 ; Yk = K / 2p = 3,5 : Yq = K / 3p = 2,333



Esquema c.a. 13.41. Devanado imbricado entero, con tres circuitos en paralelo, ejecutado por polos consecuentes y a una capa

K = 36 ; 2p = 6 ; B = K / 2 ; q = 3

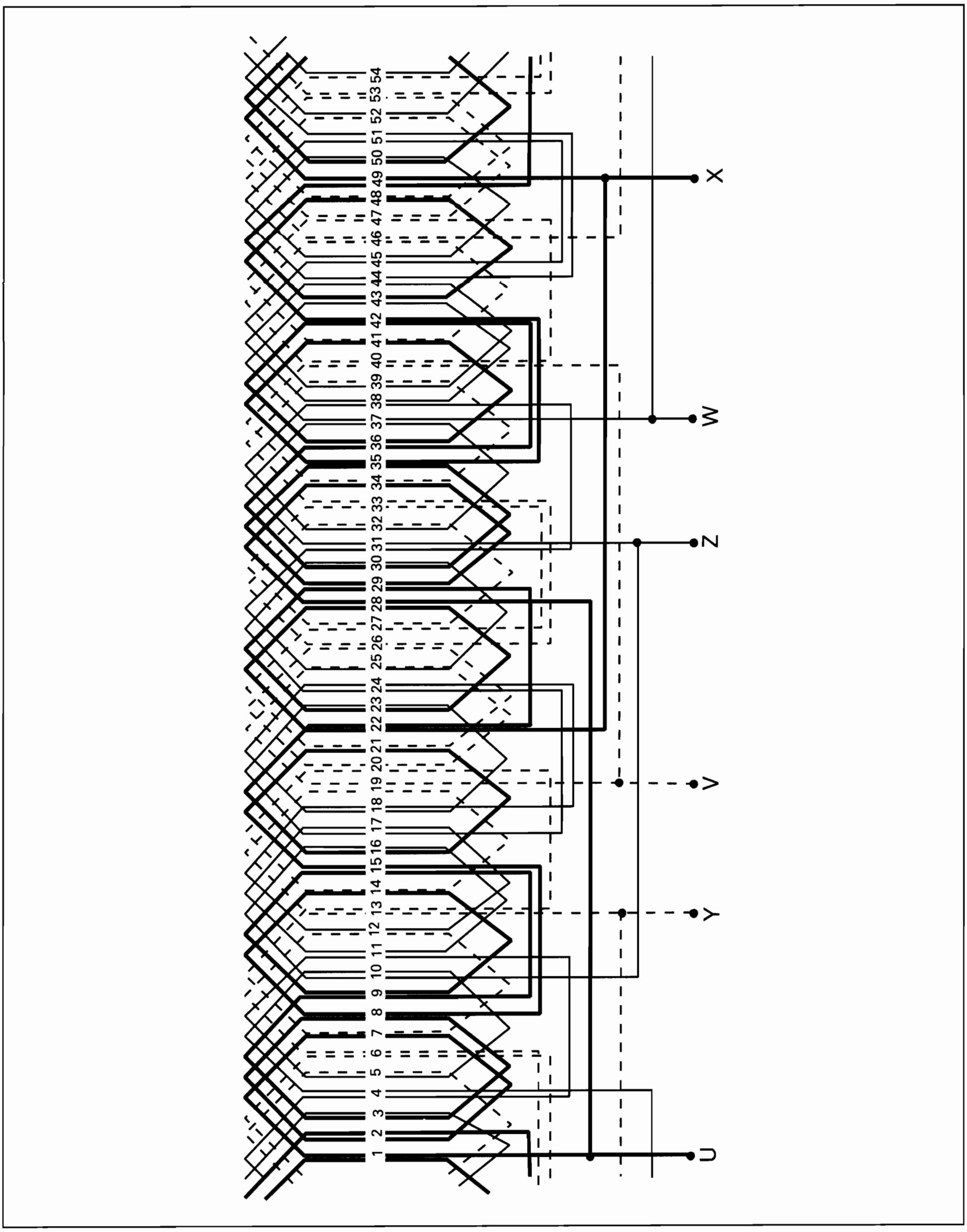
G = p · q = 9 ; Ug = B / (p · q) = 2 ; Yk = K / 2p = 6 : Yq = K / 3p = 4



Esquema c.a. 13.42. Devanado imbricado fraccionario, con cuatro circuitos en paralelo, ejecutado por polos y a doble capa

$K = 36$; $2p = 8$; $B = K$; $q = 3$

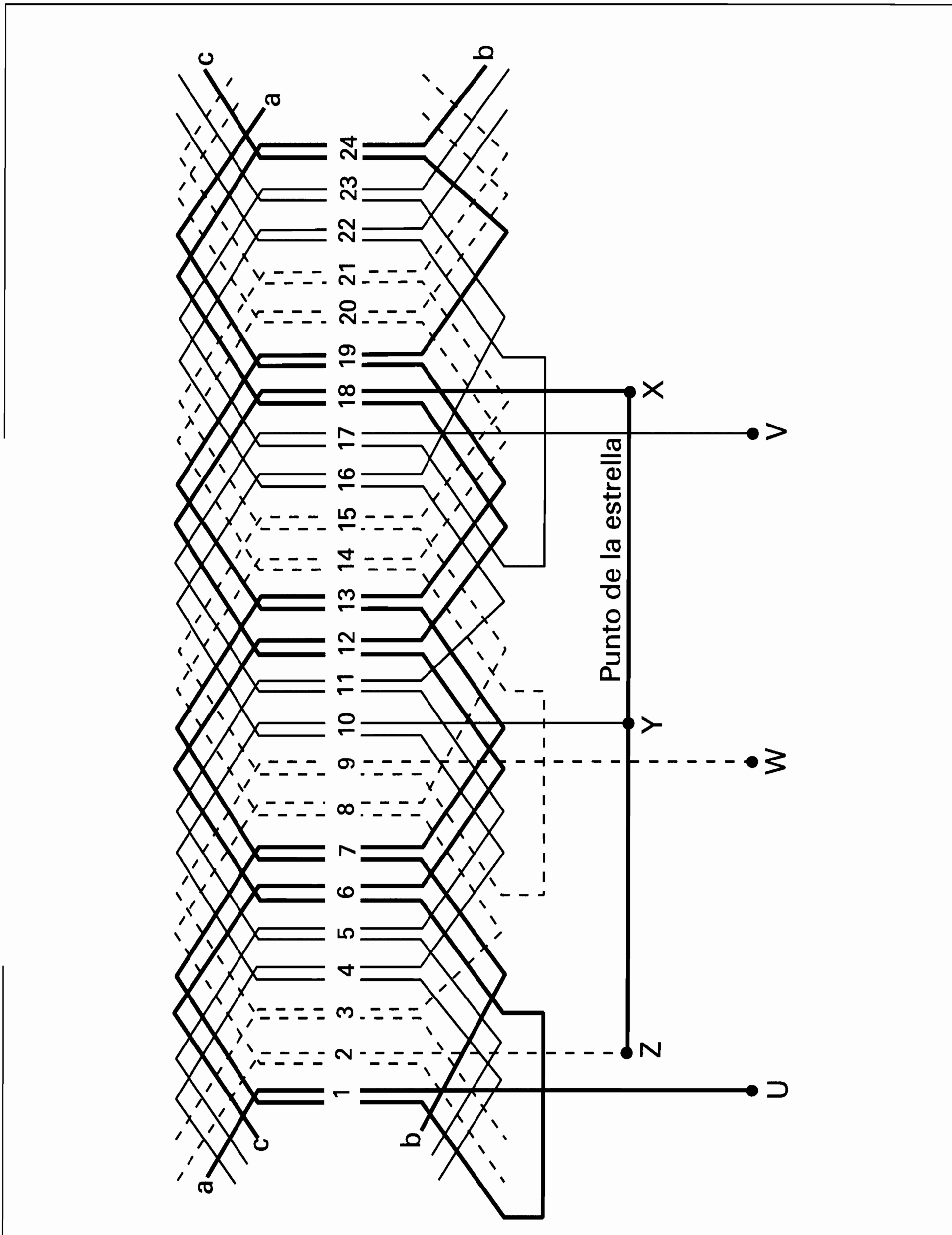
$G = 2p \cdot q = 24$; $Ug = B / (2p \cdot q) = 1½$; $Yk = K / 2p = 4{,}5$: $Yq = K / 3p = 3$



Esquema c.a. 13.43. Devanado imbricado fraccionario, con dos circuitos en paralelo, ejecutado por polos y a doble capa

K = 54 ; 2p = 8 ; B = K ; q = 3

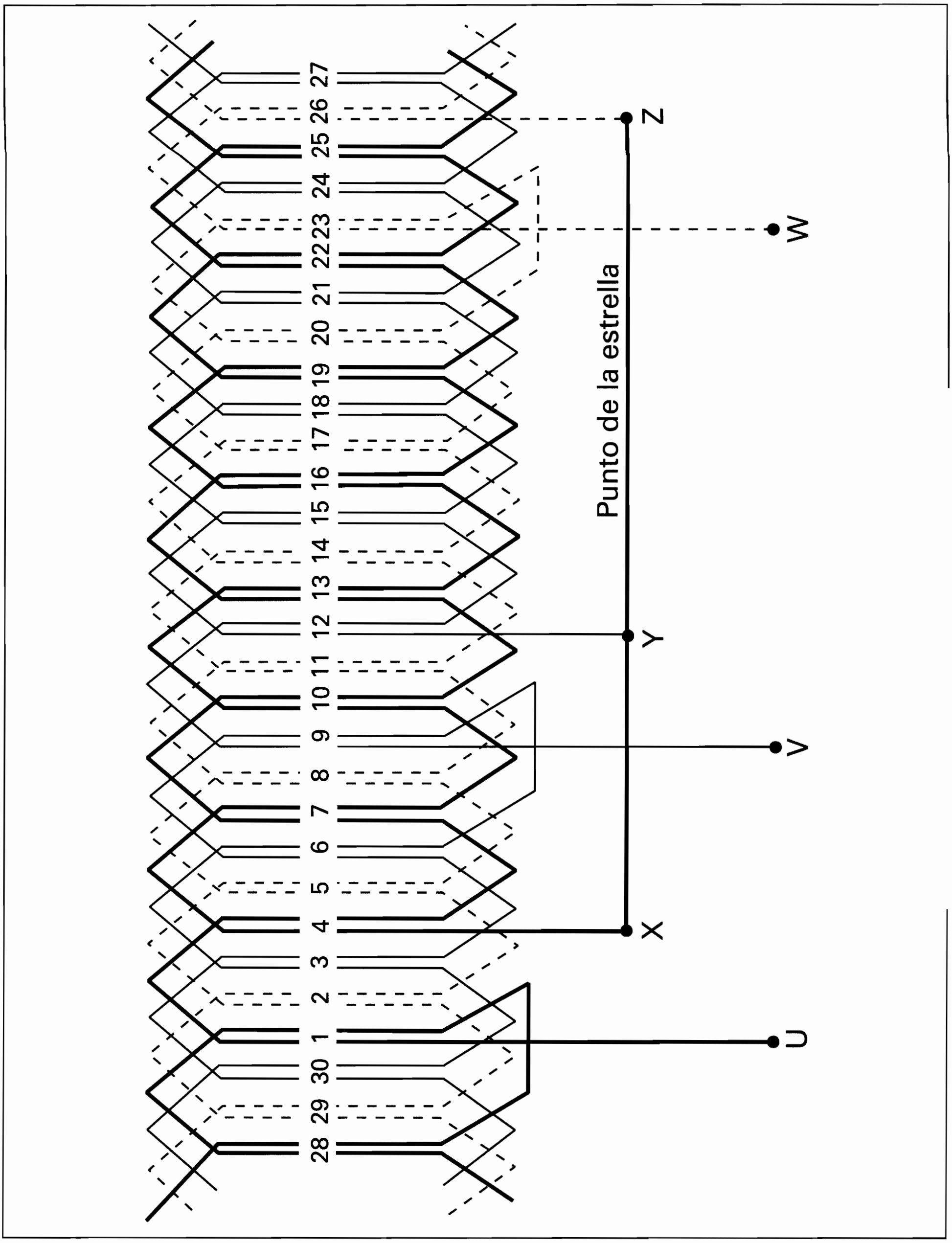
G = 2p · q = 24 ; Ug = B / (2p · q) = 2¼ ; Yk = K / 2p = 6,75 ; Yq = K / 3p = 4,5



Esquema c.a. 13.44. Devanado ondulado entero, ejecutado por polos y a doble capa

K = 24 ; 2p = 4 ; B = K ; q = 3

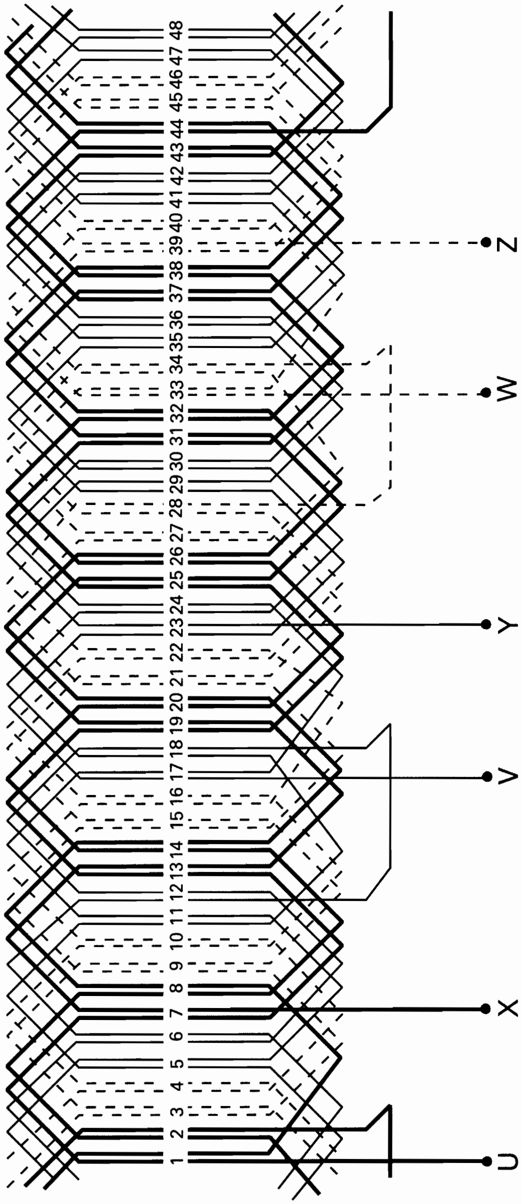
Ug = B / (2p · q) = 2 ; Y = K / p = 12 ; Yk = Y1 = K / 2p = 6 ; Y2 = Y - Yk = 6 ; Yq = K / 3p = 4



Esquema c.a. 13.45. Devanado ondulado entero, ejecutado por polos y a doble capa

K = 30 ; 2p = 10 ; B = K ; q = 3

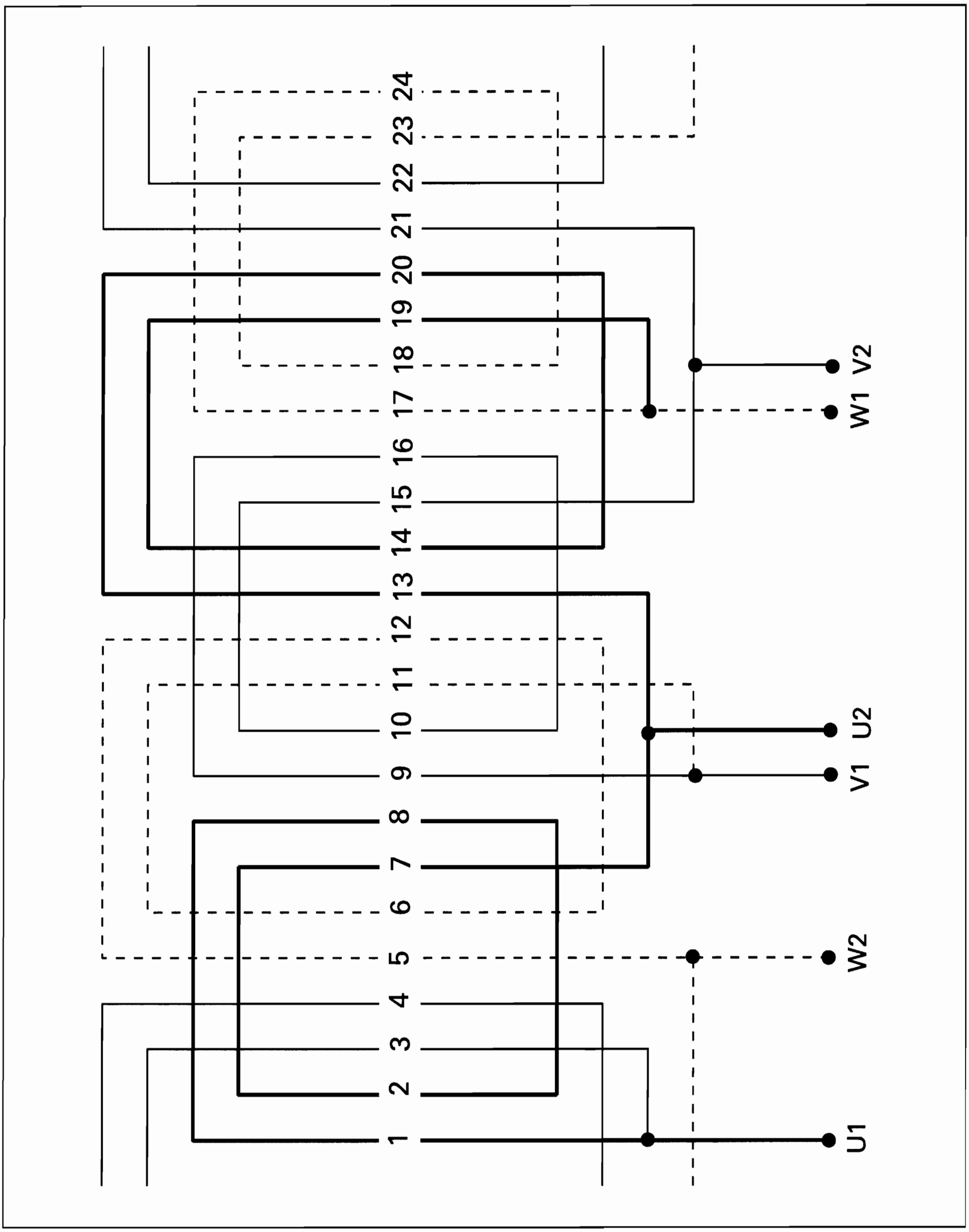
Ug = B / (2p · q) = 1 ; Y = K / p = 6 ; Yk = Y1 = K / 2p = 3 ; Y2 = Y - Yk = 3 ; Yq = K / 3p = 2



Esquema c.a. 13.46. Devanado ondulado entero, ejecutado por polos y a doble capa

K = 48 ; 2p = 8 ; B = K ; q = 3

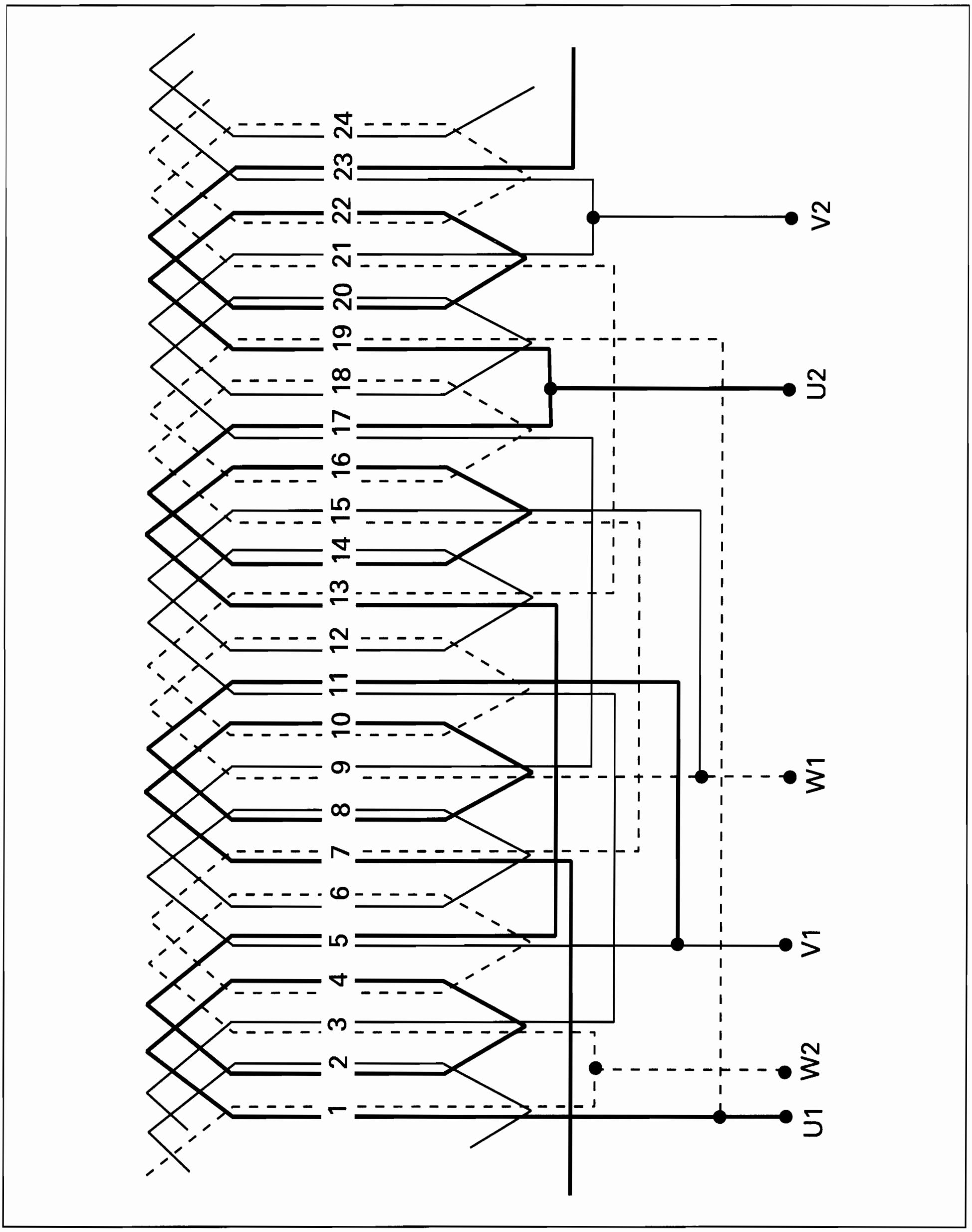
Ug = B / (2p · q) = 2 ; Y = K / p = 12 ; Yk = Y1 = K / 2p = 6 ; Y2 = Y – Yk = 6 ; Yq = K / 3p = 4



Esquema c.a. 13.47. Devanado concéntrico en conexión Dahlander (dos velocidades) ejecutado por polos consecuentes y a una capa

K = 24 ; 2p = 2 / 4 ; B = K / 2 ; q = 3

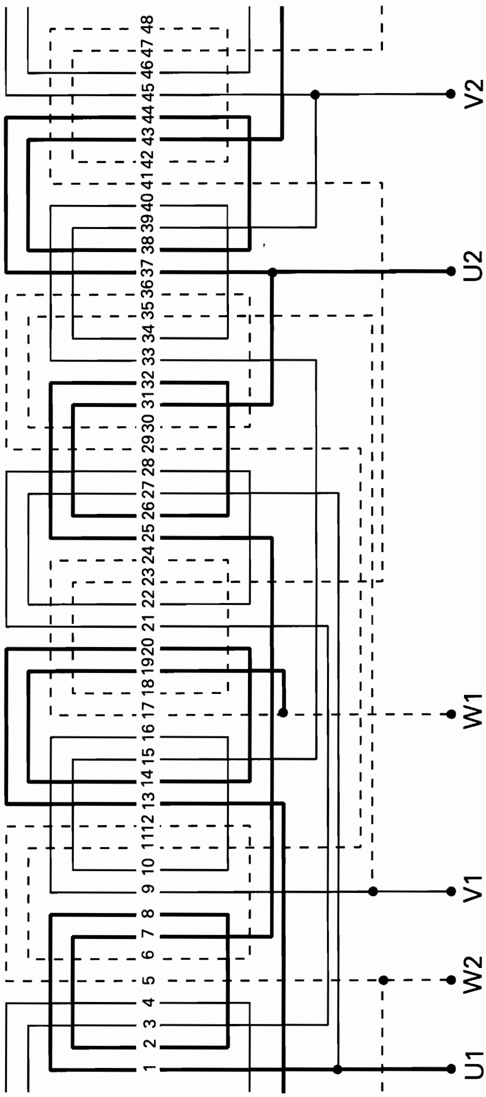
G = 2p · q = 6 ; Ug = K / 2P · q = 2 ; m = (q – 1) Ug = 4 ; Yq = K / 3p = 8



Esquema c.a. 13.48. Devanado imbricado en conexión Dahlander (dos velocidades) ejecutado por polos y a doble capa

K = 24 ; 2p = 4 / 8 ; B = K ; q = 3

G = 2p · q = 12 ; Ug = K / 2p · q = 2 ; Yk = K / 2P = 3 ; Yq = K / 3p = 4



Esquema c.a. 13.49. Devanado imbricado en conexión Dahlander (dos velocidades), ejecutado por polos consecuentes y a una capa

$K = 48$; $2p = 4 / 8$; $B = K / 2$; $q = 3$

$G = 2p \cdot q = 12$; $Ug = K / (2P \cdot q) = 2$; $m = (q - 1)\, Ug = 4$; $Yq = K / 3p = 8$

Reparación y Bobinado de Motores Eléctricos

